



TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

TUM SCHOOL OF ENGINEERING AND DESIGN

Entwicklung und Evaluation eines vernetzten HMI-Konzeptes für die urbane Verkehrssicherheit von Fahrradfahrenden

Oliver Michael Winzer, M.Sc.

Vollständiger Abdruck der von der TUM School of Engineering and Design
der Technischen Universität München
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)
genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Karsten Stahl

Prüfer der Dissertation: 1. Prof. Dr. phil. Klaus Bengler
2. Prof. Dr.-Ing. Klaus Bogenberger

Die Dissertation wurde am 26.07.2021 bei der Technischen Universität München
eingereicht und durch die TUM School of Engineering and Design
am 07.02.2022 angenommen.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich allen Personen danken, welche mich über die letzten Jahre begleitet haben und auf ihre jeweilige Art und Weise zum Gelingen dieser Promotion beigetragen haben.

Zu Beginn möchte ich meinem Doktorvater Prof. Klaus Bengler für die Betreuung meiner Dissertation danken. Für die Möglichkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Ergonomie forschen und lehren zu dürfen bedanke ich mich ebenfalls. Die Erfahrungen, die ich am Lehrstuhl sammeln durfte waren eine sehr einprägsame und lehrreiche Zeit. Darüber hinaus bedankte ich mich bei Prof. Klaus Bogenberger für die Übernahme des Zweitgutachtens.

Weiterführend gilt mein Dank all meinen ehemaligen Kolleginnen und Kollegen am Lehrstuhl mit denen ich mich über fachliche, überfachliche bis hin zu privaten Themen austauschen konnte. Mein Dank gilt dabei besonders Tanja und André. Ebenfalls gilt mein Dank allen Studierenden mit denen ich im Rahmen ihrer Studienarbeiten die Inhalte dieser Arbeit erheben konnte.

Mein größter Dank gilt meiner Familie, welche mich immer unterstützt und motiviert hat. Insbesondere danke ich meiner Frau Sibylle, welche mich über den gesamten Promotionsprozess begleitet, kritisiert, unterstützt und angespornt hat. Ohne dich wäre dies nicht möglich gewesen! Auch mein Sohn Joshua wollte mich im Alter von 7,5 Monaten beim schreiben unterstützen und hat die nachfolgenden essentiellen Buchstaben dazu beigetragen:

„nn , lklzjgukjv88uz7gh tj b b iNHJV:VVViik8,m wudwsgf“

(Joshua Winzer, am 24.03.2020).

Kurzfassung

Der urbane Verkehrsraum ist im Wandel. Geprägt durch den Klimawandel und das gesteigerte Umweltbewusstsein gewinnt das Fahrrad an Beliebtheit. Die Elektrifizierung des Fahrrades in Form von Pedelecs und E-Bikes fördert diesen Trend. Jedoch ist die momentane Infrastruktur nicht für den zunehmenden Fahrradverkehr ausgelegt wodurch sich die Verkehrssicherheit alarmierend verschlechtert. Dabei ist eine adäquate Anpassung der Infrastruktur ein mehrjähriger Prozess. Kurzfristige und flächendeckende Lösungen können mittels Smartphones geschaffen werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Human-Machine-Interface (HMI)-Konzept zur Steigerung der urbanen Verkehrssicherheit von Fahrradfahrenden entwickelt. Insbesondere wird dabei die Akzeptanz der Nutzenden gegenüber einem vernetzten System zur Kollisionsverhütung untersucht. Das HMI-Konzept besteht aus einer Smartphone-Applikation zur Kollisionsverhütung zwischen Fahrrad- und Autofahrenden. Bei der Applikation bekommen die Autofahrenden im Falle einer prognostizierten Kollision mit einem querenden Fahrradfahrenden einen Hinweis. Aus Gründen der Sicherheit werden die Fahrradfahrenden nicht informiert. Die Validierung im Feld bestätigte die technische Umsetzung. Die Akzeptanzbefragungen offenbarten hinsichtlich des Umgangs mit personenbezogenen Daten einen Widerspruch im berichteten zum ausführenden Verhalten der Nutzenden. Überwiegt der Komfort eines Systems, werden Datenschutzbedenken vernachlässigt. Diesbezüglich wurde iterativ ein gebrauchstaugliches und minimalistisches HMI zur Routenführung für Fahrradfahrende entwickelt. Vergleichend mit anderen Systemen überwiegt die Gebrauchstauglichkeit des entwickelten Fahrrad-HMI. Im Rahmen eines Methodentransfers aus der Automobilbranche – Okklusion – wurde die Verkehrstauglichkeit des Fahrrad-HMI im Vergleich zu einem etablierten Referenzsystem untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass bei beiden HMIs die relevanten Informationen innerhalb von einer Sekunde abgelesen werden können. Damit kann das entwickelte HMI-Konzept zur Erhöhung der Verkehrssicherheit von Fahrradfahrenden beitragen. Für die Definition einer einheitlichen Vorwarnzeit sind weiterführende Untersuchungen notwendig. Hierbei empfiehlt sich eine maximale Blickabwendungszeit von 750 ms als Referenzwert.

Abstract

The urban traffic space is changing. Influenced by climate change and people's increased environmental awareness, the bicycle is gaining in popularity. The electrification of the bicycle in the form of Pedelecs and e-bikes is promoting this trend. Due to the fact, that the current infrastructure is not designed for the increasing bicycle traffic the road safety deteriorating. The process of adapting the infrastructure takes several years. Short-term and comprehensive solutions can be created by using smartphones. Therefore, a Human-Machine-Interface (HMI)-concept will be developed in this thesis to increase road safety for cyclists in urban areas. In particular, the acceptance of the users towards a connected system for collision avoidance will be investigated. The HMI-concept consists of a smartphone application for collision prevention between cyclists and car drivers. With the application, car drivers receive an information in the event of a predicted collision with a cyclist crossing the road. For safety reasons, cyclists are not informed. The validation in the field confirmed the technical performance. The survey to measure the acceptance indicated a inconsistency regarding to the handling of personal data between the reported and the real behavior. If the convenience of the use of a system prevails, the mindset to the topic of data protection concerns are neglected. For this reason, a usable and minimalistic route guidance HMI for cyclists was iteratively developed. In comparison with other systems, the usability of the developed bicycle HMI prevails. As part of a method transfer from the automotive industry – occlusion – the roadworthiness of the bicycle HMI was compared to an established reference system was investigated. The results shown that for both HMIs the relevant information can be read within one second. Thus, the developed HMI concept can be used to increase the road safety of bicyclists. For the definition of a standard warning time, further investigations must be carried out. As reference for the eyes off the road time 750 ms can be used.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	V
Abstract	VI
Abbildungsverzeichnis	X
Tabellenverzeichnis	XIII
Verzeichnis studentischer Arbeiten	XV
1 Einführung in die Thematik	1
1.1 Motivation	2
1.2 Zielsetzung	4
1.3 Struktur der Arbeit	5
2 Stand der Forschung	6
2.1 Teilnehmende im urbanen Verkehrsraum	6
2.2 Vernetzte Verkehrsteilnehmende im urbanen Straßenverkehr	8
2.3 Statistiken und Analysen von Unfällen	10
2.4 Tätigkeiten und Verhaltensmuster des Menschen beim Führen eines Fahrzeuges	11
2.4.1 Systematische Betrachtung der Tätigkeiten beim Fahren eines Fahrzeuges	12
2.4.2 Ablenkung von der primären Fahraufgabe	14
2.5 Gestaltung und Evaluation von HMIs im Straßenverkehr	17
2.5.1 Allgemeine Gestaltungsrichtlinien und -empfehlungen für HMIs im Fahrzeuginnenraum	17
2.5.2 Dimensionen der Evaluation von HMIs	19
2.5.3 Das Warndilemma	23
2.5.4 Limitationen für den Zweiradbereich	24
3 Verkehrssicherheit von Fahrradfahrenden	26
3.1 Fahrradmobilität	26
3.2 Unterschiede bei der primären Fahraufgabe eines Fahrrades im Vergleich zum Kraftfahrzeug	28
3.3 Ansätze zur Steigerung der urbanen Verkehrssicherheit	30
3.3.1 Integrierte autarke Systeme im Fahrzeug	32

3.3.2	Vernetzte Systeme	35
3.3.3	Infrastrukturelle Systeme	36
3.3.4	Chancen, Limitationen und Herausforderungen der bestehenden Maßnahmen zur Steigerung der Verkehrssicherheit	37
4	Anforderungen und Prämissen für das HMI-Konzept	39
5	Iterative Entwicklung und Evaluation des HMI-Konzeptes	42
5.1	Untersuchung der Akzeptanz von vernetzten Sicherheitsmaßnahmen der Verkehrsteilnehmenden	42
5.1.1	Forschungsfragen	44
5.1.2	Methodik	44
5.1.3	Ergebnisse	45
5.1.4	Zusammenfassung und Diskussion	49
5.2	Iterative Entwicklung der Applikation zur Kollisionsverhütung	53
5.2.1	Entwicklung und Erprobung eines Prototypen zur Kollisionsverhütung	54
5.2.2	Vorstellung der Kollisionsverhütungs-Applikation	59
5.2.3	Zusammenfassung und Diskussion	63
5.3	Untersuchung von Einflussfaktoren auf die Akzeptanz der Nutzenden bezüg- lich eines V2X-Systems	65
5.3.1	Forschungsfragen und Hypothesen	66
5.3.2	Methodik	66
5.3.3	Ergebnisse	68
5.3.4	Zusammenfassung und Diskussion	73
5.3.5	Zwischenfazit	76
5.4	Entwicklung eines gebrauchstauglichen HMI für Fahrradfahrende	78
5.4.1	Vorgehen bei der Entwicklung	79
5.4.2	Navigationssysteme für den Fahrradeinsatz	81
5.4.3	Methodik	82
5.4.4	Ergebnisse	84
5.4.5	Zusammenfassung und Diskussion	92
5.5	Evaluation des Fahrrad-HMI Konzepts	96
5.5.1	Forschungsfragen und Hypothesen	97
5.5.2	Methodik	98
5.5.3	Ergebnisse	102
5.5.4	Zusammenfassung und Diskussion	107
6	Zusammenfassung und Diskussion	110
	Literaturverzeichnis	115
	Abkürzungsverzeichnis	127
	Publikationen	128
A	Anhang – Ergänzende Unterlagen zu der Untersuchung in Kapitel 5.1	129
A.1	Fragebogen nach Tondera et al. (2018)	129

A.2	Daten und Ergebnisse	135
B	Anhang – Ergänzende Unterlagen zu der Untersuchung in Kapitel 5.3	140
B.1	Fragebogen nach Eliseenkov (2019)	140
B.2	Methodik	153
B.3	Daten und Ergebnisse	157
C	Anhang – Ergänzende Unterlagen zu der Untersuchung in Kapitel 5.4	165
C.1	Nutzungskontext	165
C.2	Manöver der Navigationssysteme	178
C.3	Ergebnisse der Expertenevaluation bestehender Navigationssysteme . . .	180
C.4	Daten zum high-fidelity Prototypen	182
D	Anhang – Ergänzende Unterlagen zu der Untersuchung in Kapitel 5.5	191
D.1	Versuchsunterlagen	191
D.2	Daten und Ergebnisse	197

Abbildungsverzeichnis

2.1	Übersicht der im deutschen Straßenverkehr getöteten Fahrradfahrenden in den Jahren 2011 – 2019; gegliedert nach der Ortslage.	12
2.2	Prozess zur Gestaltung gebrauchstauglicher interaktiver Systeme.	18
2.3	Technology Acceptance Model.	22
2.4	Car Technology Acceptance Model.	23
3.1	Entwicklung des Modal Split in Abhängigkeit von der Distanz der Strecken und des Raumtyps.	28
4.1	Untersuchungsszenario (T-Kreuzung mit Fahrradweg).	40
5.1	Der Screeplot zur Hauptkomponentenanalyse und die erklärte kumulierte Varianz der Faktoren.	49
5.2	Schematische Darstellung eines beispielhaften Szenarios mit Bezug auf die jeweiligen Zustände des HMI sowie den Bedingungen für einen warnenden Hinweis; den geografischen Beschaffenheiten des Feldtests nachempfunden.	56
5.3	HMI aus der Perspektive der autofahrenden Person.	57
5.4	Zeitpunkt eines Gefahrenhinweises im Feldversuch aus mehreren Perspektiven.	59
5.5	Thematische Struktur des Fragebogens mit den jeweiligen Perspektiven sowie den verwendeten Methoden.	67
5.6	Skala zur Bewertung der Kritikalität von Fahr- und Verkehrssituationen.	69
5.7	Boxplot Diagramme zur wahrgenommenen Kritikalität sowohl mit als auch ohne der Applikation.	70
5.8	Portfolioeinordnung des gemittelten Ergebnisses zum AttrakDiff.	71

5.9	Deskriptive Ergebnisse (Mittelwerte mit Standardfehler) der beiden Akzeptanz-erhebungen mittels des CTAM-Fragebogens.	72
5.10	Übersicht der vier zu evaluierenden Navigationssysteme kurz vor einer Rechts- kurve.	82
5.11	Gesamter Bildausschnitt der Videoaufzeichnungen.	86
5.12	Links die schematische Struktur des Fahrrad-HMI. Rechts ein beispielhaftes Szenario während der Anwendung.	88
5.13	Einstufung des gemittelten Score des SUS für das entwickelte Fahrrad-HMI nach Bangor et al. (2009).	92
5.14	Auffüllen des Navigationspfeiles in Abhängigkeit von der Entfernung bis zum Ausführen des Manövers.	93
5.15	Schematischer Versuchsaufbau mit den allgemeinen Abmessungen und dem Blickwinkel zwischen Display und Leinwand unter Beachtung der durchschnittli- chen Augenhöhe der Probanden.	99
5.16	Versuchsfahrrad (links); Perspektive aus Sicht der Fahrenden mit eingeblende- tem HMI (mitte); Darstellung der Fragen auf der Leinwand (rechts).	100
5.17	Versuchsdesign zur Okklusionsmethode.	102
5.18	Mittlere Korrektheitsrate (mit Standardfehler) für beide Konzepte sowie deren gemittelter Wert; unabhängig von der Okklusionsaufgabe aufgetragen über die Anzeigedauern.	103
5.19	Ergebnis des modifizierten Post-Study-System-Usability-Questionnaire (PSSUQ)- Fragebogens mit den gemittelten Likert-Werten und dem Standardfehler. . . .	106
B.1	Deskriptive Ergebnisse (Mittelwerte mit Standardfehler) zum CTAM gegliedert nach den Subskalen für beide Erhebungszeitpunkte (N = 143).	159
B.2	Ergebnis der semantischen Analyse des AttrakDiff 2; gemittelt nach Items und gesamt Wert; geclustert nach den Subskalen (N = 143).	160
C.1	Persona (Bandmann et al., 2019).	178

C.2	Anzeigezustände des Fahrrad-HMI beim Geradeaus fahren (Szenario Nr. 1) und jeweils bei der Annäherung an ein Abbiegen nach links und rechts (Szenario Nr. 2 & 3; Bandmann et al., 2019).	183
C.3	Anzeigezustände des Fahrrad-HMI bei einer unmittelbar aufeinander folgenden Kombination aus einer Links- und Rechtskurve (Szenario Nr. 5; Bandmann et al., 2019).	184
C.4	Anzeigezustände des Fahrrad-HMI bei einem Abbiegevorgang mit einem Winkel von größer (Szenario Nr. 6) oder kleiner (Szenario Nr. 7) als 90° (Bandmann et al., 2019).	185
C.5	Anzeigezustände des Fahrrad-HMI bei Anzeige eines Wendemanövers (Szenario Nr. 8) und dem Erreichen des Zielorts (Szenario Nr. 9) (Bandmann et al., 2019).	186
C.6	Angaben zu den im Fahrrad-HMI unterschiedlichen Zeichenhöhen bei 50 cm Abstand vom Kopf zum Lenker auf einem 5" Display (nach Bandmann et al., 2019).	187
D.1	Verwendete Ausprägungen des Fahrrad-HMI Konzepts (nach Bandmann et al., 2019; F. Winkler, 2020).	194
D.2	Verwendete Ausprägungen des HMI von Google Maps (F. Winkler, 2020).	195
D.3	Linienplot zu der Okklusionsaufgabe Nr. A (nach F. Winkler, 2020).	199
D.4	Linienplot zu der Okklusionsaufgabe Nr. B (nach F. Winkler, 2020).	199
D.5	Linienplot zu der Okklusionsaufgabe Nr. C (nach F. Winkler, 2020).	199
D.6	Linienplot zu der Okklusionsaufgabe Nr. D (nach F. Winkler, 2020).	200
D.7	Linienplot zu der Okklusionsaufgabe Nr. E (nach F. Winkler, 2020).	200
D.8	Boxplot zu den gemittelten Antworten der beiden Konzepte (N = 32).	201

Tabellenverzeichnis

3.1	Übersicht bestehender Anzeigesysteme zum Befestigen am Fahrrad oder zum Tragen am Körper (unabhängig von der Zulässigkeit).	34
5.1	Items zur Messung der Nutzerakzeptanz.	45
5.2	Ergebnisse der Itemanalyse.	48
5.3	Ergebnisse der qualitativen Datenauswertung bezüglich der grundlegenden Einstellung hinsichtlich eines smartphonebasierten Ansatzes zur Unfallverhütung.	50
5.4	Übersicht der Ergebnisse des Feldtests zur technischen Überprüfung des Prototypen.	59
5.5	Ausprägungen der Applikation des HMI.	61
5.6	Ergebnisse der heuristischen Evaluation der Referenzsysteme.	87
5.7	Ergebnis der heuristischen Evaluation zum Fahrrad-HMI.	91
5.8	Ergebnisse des Bewertungsindex zur Vergleichbarkeit der fünf HMIs.	94
5.9	Die bei dem Okklusionsversuch zur Anwendung gekommenen Fragestellungen (nach F. Winkler, 2020).	98
5.10	Ergebnisse der 3-faktoriellen ANOVA mit Messwiederholung zu den Haupt- und Interaktionseffekten.	105
A.1	Ergebnisse der Itemanalyse unter Ausschluss der neun Probanden, welche die Systematik der Applikation nicht verstanden haben (N = 144).	139
B.1	Erläuterung der Bedeutung der Determinanten des Car Technology Acceptance Model (CTAM) Fragebogens in Tabelle B.2 (Osswald et al., 2012).	153
B.2	CTAM Fragebogen mit den englischsprachigen Items aus dem originalen Fragebogen und den ins Deutsche übersetzten Items.	153

B.3	Deskriptives Ergebnis der Subskalen des AttrakDiff (N = 143).	160
C.1	Navigationsmanöver mit Angabe des Ortes in München.	179
C.2	Gruppierte und komprimierte Zusammenstellung der Ergebnisse des Cognitive Walkthrough der ausgewählten Navigationssysteme.	180
C.3	Anzahl der verletzten Heuristiken der jeweiligen Navigationssysteme.	181
C.4	Zusammenfassung der Anregungen aus der abschließenden Befragung der Experten zu den vier Navigationssystemen.	182
C.5	Berechnung und Überprüfung der Zeichenhöhen des entwickelten Fahrrad-HMI nach der DIN EN ISO 15008 bei einer Displaygröße von 5" und einem Abstand von 50 cm vom Kopf zum Lenker (nach de Waard et al., 2017).	187
C.6	Verwendete Farben und deren Anwendungszweck im Fahrrad-HMI.	188
C.7	Kontrastverhältnisse der Elemente zum jeweiligen Hintergrund.	189
C.8	Komprimierte Zusammenstellung der Ergebnisse des Cognitive Walkthrough zum entwickelten Navigationssystem.	190
C.9	Zusammenfassung der genannten Aspekte der abschließenden Befragung der Experten zu dem entwickelten Fahrrad-HMI.	190
D.1	Berechnung und Überprüfung der Zeichenhöhen für das Google Maps HMI (Schriftart: Roboto) nach der DIN EN ISO 15008 bei einer Displaygröße von 5" und einem Abstand von 50 cm vom Kopf zum Lenker (nach de Waard et al., 2017).	195
D.2	Mauchly-Test auf Sphärizität.	198

Verzeichnis studentischer Arbeiten

Im Rahmen des Dissertationsvorhabens erfolgte die wissenschaftliche, fachliche sowie inhaltliche Betreuung und Anleitung, der im nachfolgenden genannten studentischen Arbeiten, durch den Autor dieser wissenschaftlichen Abhandlung. Die generierten und überprüften Erkenntnisse sind teilweise in diese Arbeit mit eingeflossen.

- Solbeck, C. (2017). *Evaluation eines 3D-Audio-Displays zur Steigerung des Raumbewusstseins von Piloten* (Master Thesis). Technische Universität München.
- Tondera, M., Hera, C. & Eliseenkov, P. (2018). *Akzeptanz und Realisierung eines Smartphone-basierten Ansatzes zur Steigerung der Verkehrssicherheit von Fahrradfahrern* (Interdisziplinäres Projekt). Technische Universität München.
- Drews, J. (2018). *Digitalisierung von Zweirädern* (Bachelor Thesis). Technische Universität München.
- Schambeck, S. (2018). *Evaluierung des visuellen Ablenkungspotenzials zweier User Interface Konzepte eines Ampelassistenten im Fahrsimulator anhand einer Blickanalyse* (Master Thesis). Technische Universität München.
- Frank, A. (2018). *Entwicklung von Konzepten eines Ampel- und Abbiegeassistenten als mobile Anwendung im Fahrzeug* (Master Thesis). Technische Universität München.
- Haag, C. (2018). *Empirischer Vergleich zweier Eye-Tracking-Systeme unter Beachtung der ISO 15007* (Semesterarbeit). Technische Universität München.
- Eliseenkov, P. (2019). *Akzeptanz von Smartphone-basierter Verkehrssicherheit für Fahrradfahrer* (Master Thesis). Technische Universität München.

- Bandmann, C., Hammer, T., Potten, H. & Winkler, F. (2019). *Evaluation von Fahrradnavigationssystemen und Konzeption eines benutzungsfreundlichen Fahrradnavigationssystems nach DIN EN ISO 9241-210* (Interdisziplinäres Projekt). Technische Universität München.
- Winkler, F. (2020). *Evaluierung zweier Fahrradnavigationssysteme – Eine Suitability- und Usability-Untersuchung unter Laborbedingungen* (Master Thesis). Technische Universität München.

1 Einführung in die Thematik

Der gesellschaftliche und politische Stellenwert des Fahrrades hat in den letzten Jahren zum einen als Statusobjekt und zum anderen als Transport- und Fortbewegungsmittel an Bedeutung gewonnen. Die Gründe sind dabei sehr vielseitig: Der nachhaltigere Umgang vieler Menschen mit natürlichen Ressourcen fördert den Verkehrswandel. Die Problematik eines immer größer werdenden Verkehrsaufkommens, insbesondere von Personenkraftwagen (Pkw) in Ballungsgebieten – z. B. München, Hamburg oder Berlin – über die letzten Jahrzehnte, unterstützt diesen Trend zunehmend. Neben der stetig steigenden Anzahl von Fahrzeugen nimmt auch die Fahrzeuggröße kontinuierlich zu. Hingegen bleibt das Platzangebot für Verkehrswege im urbanen Raum nahezu gleich. Dieses reduziert sich sogar teilweise durch eine Vielzahl von Nachverdichtungsprogrammen zur Schaffung von Wohnräumen. Diese und weitere Faktoren führen dazu, dass sich ein Wandel des Mobilitätsverhaltens im urbanen Verkehrsraum vollzieht (Bengler et al., 2018; Eisenberger, 2020; Kabell, 2016; Nobis & Kuhnimhof, 2019).

Gefördert und bestärkt wird dieser Trend durch die Elektrifizierung von Fahrrädern in Form von sogenannten E-Bikes als massentaugliches Produkt. Dabei werden unter dem Begriff E-Bike unterschiedliche Bauarten von elektrifizierten Fahrrädern zusammengefasst. In Abhängigkeit vom Elektrifizierungsgrad eines Fahrzeuges gelten differenzierte rechtliche Zulassungsaufgaben (siehe Abschnitt 2.1). Die aktuelle Beliebtheit von E-Bikes spiegelt sich ebenfalls in den sehr stark ansteigenden Absatzzahlen wider (rund 36 % im Jahr 2018 und knapp 39 % im Jahr 2019 jeweils im Vergleich zum Vorjahr (Eisenberger, 2019, 2020)). Laut Prognosen des Wirtschaftsverbandes wird sich dieser Trend auch in den nächsten Jahren weiter fortsetzen (Eisenberger, 2020). Die Begründung für die hohe Akzeptanz und Beliebtheit von E-Bikes ist dabei sehr vielseitig. Für einige Menschen wird ihr Bewegungsradius deutlich vergrößert. Für ältere Menschen oder Personen mit Bewegungseinschränkungen wird dadurch die Teilnahme am Straßenverkehr mit diesen

Verkehrsmitteln erst wieder ermöglicht oder erleichtert (Nobis, 2019). Im Vergleich zum herkömmlichen Fahrrad zeigt sich, dass E-Bikes eine deutlich höhere durchschnittliche Geschwindigkeit erreichen (Schleinitz et al., 2017). Dies führt dazu, dass die rechtlich gesehene Gruppe der Fahrradfahrenden (Fahrrad & E-Bike) nach § 63a Absatz 2 StVZO deutlich heterogener geworden ist. Dadurch nehmen sowohl das Konfliktpotenzial innerhalb der Gruppe als auch mit anderen Teilnehmenden am Verkehr zu. Durch die gesteigerte Geschwindigkeitsdifferenz zwischen den Teilnehmenden wird die Verkehrssicherheit negativ beeinflusst. Belege dafür sind unter anderem die gestiegene Anzahl an tödlich verunglückter Fahrradfahrenden sowie Verkehrsunfälle mit Personenschaden innerhalb der Gruppe der Fahrradfahrenden in den letzten beiden Jahren (Statistisches Bundesamt, 2019c).

1.1 Motivation

Das Smartphone hat sich im Alltag der meisten Menschen als universeller Begleiter etabliert. Für nahezu jeden Anwendungskontext existieren Applikationen, wodurch das Smartphone an vielen Tätigkeiten teilnimmt oder den jeweiligen Tätigkeitsprozess beeinflusst. Laut des Statistischen Bundesamtes (2019b) sind 97 % der deutschen Haushalte mit mindestens einem Smartphone ausgestattet. Wird dieses durch die Nutzenden bei gleichzeitig aktiver Teilnahme am Straßenverkehr verwendet, entsteht dadurch ein großes Gefahrenpotenzial. Die gesetzlichen Vorgaben zur Verwendung eines mobilen Endgerätes für die fahrzeugführende Person – unabhängig von der Art des jeweiligen Fahrzeuges – sind im § 23 StVO geregelt. Vergleichbare Gesetze und Richtlinien sind in fast allen Ländern der Welt vorzufinden (Mwakalonge et al., 2014).

Verkehrsbeobachtungen von autofahrenden und fahrradfahrenden Personen zeigen jedoch, dass das widerrechtliche Ausüben von visuellen-manuellen Nebentätigkeiten – texten mit dem Smartphone – in den letzten Jahren zugenommen hat, wohingegen das Telefonieren rückläufig ist (de Waard et al., 2015; Huemer et al., 2019; Huemer et al., 2018; Terzano, 2013; Wolfe et al., 2016). Aus dem Forschungsfeld der Fahrerablenkung beim Automobil ist hinreichend nachgewiesen worden, dass das Ausüben von fahrfremden Tätigkeiten – insbesondere visuell-manuelle Aufgaben – beim Steuern eines Fahrzeuges eine

Ablenkung von der primären Tätigkeit verursacht (bspw. Bengler, 2014; Bengler et al., 2018; Bubb, Bengler, Grünen et al., 2015; Conti-Kufner, 2017; Kathmann et al., 2019; Strayer et al., 2013; Vollrath et al., 2015; Winner et al., 2015; Young, 2015). Diese grundlegende Erkenntnis trifft auch auf den Kontext des Fahrradfahrens zu, da die primären Tätigkeiten beim Fahrradfahren ebenfalls die visuellen und manuellen Sinneskanäle beanspruchen (Wickens et al., 2016). Im Kontext der zunehmenden Elektrifizierung von Fahrrädern ergibt sich dadurch die Chance, Pedelecs und E-Bikes mit adaptierten Infotainment- oder Assistenzsystemen auszustatten. Diese wiederum könnten damit zukünftig auch zur Steigerung der Verkehrssicherheit beitragen.

Die Einführung von bereits etablierten Sicherheitsmaßnahmen (z. B. Sicherheitsgurt) im Kraftfahrzeugbereich zeigt, dass auch diese Systeme anfangs von den Nutzern skeptisch betrachtet oder sogar teilweise abgelehnt wurden. Dies war beispielsweise beim Dreipunktsicherheitsgurt im Kraftfahrzeug der Fall. Heutzutage ist dieser eine Selbstverständlichkeit. Bei der Einführung war ein großer Teil der Bevölkerung sehr misstrauisch und lehnte diesen eher ab (Deutsches Patent- und Markenamt, 2019). Obwohl die Wirksamkeit dieser Maßnahme bereits bei den ersten Unfällen, wie zum Beispiel dem missglückten „Baker Torpedo“ Rekordversuch 1902, nachgewiesen werden konnte, änderte auch die im Jahr 1976 eingeführte Gurtpflicht nicht viel an der Einstellung. Erst die Ahndung dieses Regelverstoßes ab 1984 mit einem Bußgeld führte dazu, dass sich die Bevölkerung daran gewöhnte und diese Maßnahme akzeptierte (Deutsches Patent- und Markenamt, 2019). Ein anderes Beispiel ist der sogenannte *eCall* (Kurzform für emergency call). Der eCall ist ein im Pkw integriertes Notrufsystem, welches durch das Betätigen eines Knopfes automatisch einen Notruf absetzt. Seit Anfang April 2018 müssen alle Neufahrzeuge, die in der EU zugelassen werden, mit diesem System ausgestattet sein. Die Entwicklung des eCall Systems begann ursprünglich Ende der 70er-Jahre in einem geförderten Pilotprojekt der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) (Emser, 1981). Aufgrund der zu dem Zeitpunkt noch nicht vorhandenen Global Positioning System (GPS) Positionsbestimmung sowie keines flächendeckenden Mobilfunknetzes standen die Kosten für ein solches System nicht in Relation zu dem daraus resultierenden Nutzen, womit dieser Ansatz nicht weiter verfolgt wurde. Mehrere Jahre später griff ein Konsortium aus der Versicherungswirtschaft

und Industrie diesen Ansatz erneut auf und entwickelte einen smartphonebasierten Unfallmeldedienst. Ein zusätzlicher Stecker für den 12 V Anschluss registriert einen Unfall und sendet über das gekoppelte Smartphone automatisch einen Notruf (Suliak, 2016). Die Wirksamkeit dieses Ansatzes führte zu einer Weiterentwicklung als Fahrzeug integriertes System, welches in Europa mittlerweile in jedem Neufahrzeug verbaut werden muss.

1.2 Zielsetzung

Das im Rahmen dieser Dissertation verfolgte Ziel ist die Entwicklung und Untersuchung eines HMI-Konzeptes zur Steigerung der Verkehrssicherheit von Fahrradfahrenden im urbanen Verkehrsraum. Untersucht werden sollen dabei, wie und unter welchen Umständen ein mobiles Endgerät – vorwiegend ein Smartphone – positiven Einfluss auf die Verkehrssicherheit ausüben kann. Gleichzeitig soll auch das Komfortbedürfnis der Fahrradfahrenden nach einem Informationssystem nicht unbeachtet bleiben.

Hierzu werden die Umstände, unter denen es zu Verkehrsunfällen, insbesondere mit anderen Verkehrsteilnehmenden kommt, betrachtet. Weiterführend werden bereits in der Literatur identifizierte Lösungsvorschläge analysiert und diskutiert. Unter Beachtung allgemeiner ergonomischer Gestaltungskriterien wird iterativ ein Lösungsansatz entwickelt und weitestgehend evaluiert. Unabhängig von der lokalen Infrastruktur sollte das Konzept möglichst viele Gefahrensituationen adressieren können und somit universell anwendbar sein. Die Evaluierung wird sich vorwiegend auf die Bewertungskriterien der Gebrauchstauglichkeit (engl. Usability) beschränken. Aufgrund der Abwesenheit von etablierten Methodiken ist im Zweiradsektor die Absicherung der Straßenverkehrseignung (engl. Suitability) nicht möglich (vgl. Abschnitt 2.5.4). Im Rahmen der letzten Studie (siehe Kapitel 5.5) wird ein Transfer des Okklusionstests aus den Suitability-Methoden des Automobilsektors vollzogen. Durch die vergleichende Anwendung mit einem Referenzsystem ist eine relative Einschätzung der Eignung für den Einsatz im Straßenverkehr möglich. Jedoch fehlen für eine absolute Einstufung beider Systeme vordefinierte und allgemeingültige Grenzwerte. Abschließend wird dieser Aspekt noch tiefer greifend diskutiert und Handlungsempfehlungen ausgesprochen.

1.3 Struktur der Arbeit

Diese Arbeit ist in sechs Kapitel gegliedert. Das erste Kapitel dient der Einführung und Sensibilisierung für die Thematik sowie der Festlegung des verfolgten Zieles dieser wissenschaftlichen Arbeit. Die allgemeinen Grundlagen des urbanen Verkehrs, der Unfallforschung, der Interaktion von Mensch-Maschine-Systemen (MMSen) sowie Richtlinien und Empfehlungen zur Gestaltung von Human-Machine-Interfaces (HMIs) bei der Anwendung im Straßenverkehr sind in Kapitel 2 dargestellt. In Kapitel 3 werden die Eigenschaften des Fahrradfahrens sowie die Verkehrssicherheit der Fahrradfahrenden fokussiert. Darauf aufbauend wird in Kapitel 4 das HMI-Konzept vorgestellt sowie die Entwicklungsprämissen zusammengefasst. Basierend darauf sind in Kapitel 5 die fünf Stufen der Untersuchung und Entwicklung dargestellt, welche abschließend in Kapitel 6 zusammengefasst und im Gesamtkontext diskutiert werden.

2 Stand der Forschung

In diesem Kapitel sind die für diese wissenschaftliche Arbeit relevanten Grundlagen zusammenfassend aufbereitet.

2.1 Teilnehmende im urbanen Verkehrsraum

Der urbane Verkehrsraum ist ein sehr komplexes Konstrukt. Neben der vielseitigen Infrastruktur ist auch das Spektrum an unterschiedlichen Teilnehmertypen sehr variabel. Ebenso ist das Verhalten innerhalb einer Gruppe von Teilnehmenden nicht zwangsläufig homogen verteilt. Das individuelle Verhalten eines Teilnehmenden ist durch dessen intrinsische Motivation zur Fortbewegung im Straßenverkehr geprägt und wird durch das Verhalten der umgebenen Teilnehmer sowie der Infrastruktur beeinflusst. Dabei steigt der Grad der Komplexität eines Szenarios mit der Anzahl weiterer Akteure stetig an. Ebenso wirken auch die äußeren Einflussfaktoren auf das individuelle Verhalten ein. Beispielsweise sind dies zum einen die festen topografischen Eigenschaften des jeweiligen Verkehrsraums und zum anderen die zeitabhängigen Faktoren wie Wetter, Tageszeit und Jahreszeit.

Die Verkehrswege können differenziert werden in Wege, welche vorbehaltlich nur von Fußgängern und/oder Fahrradfahrenden verwendet werden dürfen bis hin zu Straßen, welche ausschließlich für die Befahrung durch Pkws vorgesehen sind. Neben gemeinsam genutzten Verkehrswegen haben auch die rein fahrzeugspezifischen Wege regelmäßig Berührungen mit anderen Wegen oder Kreuzungspunkten, womit zwangsläufig eine Interaktion zwischen den Verkehrsbeteiligten zustande kommt. Die darin agierenden Teilnehmenden können nach ihrem jeweiligen Fortbewegungstyp (gem. StVO, StVG und StVZO) differenziert betrachtet werden. In der Verkehrsforschung hat sich eine Gliederung in zwei Gruppen etabliert: Den Autofahrenden und den Schwächeren am Verkehr Teilnehmenden, sogenannte Vulnerable Road User (VRU). (Bengler et al., 2018)

Häufig assoziiert werden die schwächeren Teilnehmenden durch die Fahrradfahrenden und zu Fuß gehenden Personen. Gleichwohl gibt es noch deutlich mehr Fortbewegungstypen – z. B. E-Scooter, Tretroller oder Segways. Diese machen jedoch einen geringeren Anteil an der Gruppe aus und werden fortführend nicht tiefergehend betrachtet. Aus den Statistiken und Untersuchungen von Unfällen ist ebenfalls zu entnehmen, dass das Lebensalter der Beteiligten einen Einfluss hat. Kinder und ältere Menschen kommen im urbanen Verkehrsraum häufiger zu Schaden (Hummel & Lang, 2016; Statistisches Bundesamt, 2019c; von Below, 2016).

Im Rahmen dieser Arbeit ist insbesondere die Gruppe der Fahrradfahrenden von zentraler Bedeutung, weshalb diese eingehender betrachtet wird. Ein Fahrrad ist dadurch gekennzeichnet, dass es sich um „ein Fahrzeug mit mindestens zwei Rädern, das ausschließlich durch die Muskelkraft auf ihm befindlicher Personen mit Hilfe von Pedalen oder Handkurbeln angetrieben wird“ (§ 63a Absatz 1 StVZO) handelt. Die Gruppe der Fahrradfahrenden ist in den letzten Jahren deutlich vielfältiger geworden. Neben den herkömmlichen Fahrradfahrenden haben sich die sogenannten *E-Bikes* im Verkehr etabliert. Die Verwendung dieses Terminus ist dabei etwas irreführend, da der umgangssprachliche Gebrauch des Begriffes von der rechtlichen Deklaration abweicht. Der Gesetzgeber bezeichnet E-Bikes als Fahrzeuge mit einem eigenständigen Antrieb, welche somit unabhängig der Trittleistung betrieben werden können (§ 23 StVO). In Abhängigkeit vom Leistungsumfang und der Bauart sind diese Fahrzeuge mindestens als Mofa – kleinste Variante – bis hin zum Motorrad eingestuft. Bei den im Allgemeinen als E-Bikes bezeichneten Transportmitteln handelt es sich vom rechtlichen Standpunkt her um ein *Pedal Electric Cycle*, sogenanntes *Pedelec*. Dabei sind Pedelecs Fahrräder mit einer Tretunterstützung bis zu einer Geschwindigkeit von 25 km/h bei einer Nenndauerleistung von maximal 250 Watt. Für die Fortbewegung ist somit eine Muskelkraft zwingend notwendig. Pedelecs gelten daher nicht als Kraftfahrzeug im Sinne des § 1 Absatz 3 StVG, sondern sind als Fahrräder (§ 63a Absatz 2 StVZO) eingestuft.

Der Gesetzgeber sieht jedoch auch Pedelecs mit einer Nenndauerleistung von bis zu 4 KW und einer motorgestützten Höchstgeschwindigkeit von bis zu 45 km/h vor. Diese werden als *Speed-Pedelec* oder *S-Pedelecs* bezeichnet. Diese erfüllen die Anforderungen des

§ 1 Absatz 3 StVG und gelten damit nach § 2 Absatz 11a FZV als Kleinkrafträder. Für das Fahren von S-Pedelecs gelten damit deutlich restriktivere Bedingungen bei der Anwendung als bei einem Fahrrad oder Pedelec. Beispielsweise besteht eine Versicherungspflicht des Fahrzeuges, zum Fahren ist eine Fahrerlaubnis der Klasse AM notwendig, ein Mindestalter von 16 Jahren ist vorgeschrieben und das Tragen eines Helms ist verpflichtend. Ferner ist auch die Nutzung von Fahrradwegen unzulässig. Der Verkaufsanteil der S-Pedelecs gegenüber Pedelecs ist jedoch sehr gering – 0,5 % im Jahr 2018 (Eisenberger, 2019).

2.2 Vernetzte Verkehrsteilnehmende im urbanen

Straßenverkehr

Der Schutz von personenbezogenen Daten ist in Deutschland ein sehr brisantes Thema. Insbesondere durch die von der Europäischen Union (EU) beschlossene Datenschutzgrundverordnung hat die Thematik an Popularität gewonnen (Council of European Union, 2016). Befragungen dazu legen nahe, dass die Freigabe von personenbezogenen Daten für Unternehmen – in Form von Funktionsanwendungen – für viele Menschen als sehr kritisch angesehen wird (Demmel, 2015; Winzer et al., 2020). Die Untersuchung von Sokoll & Herrmann (2020) bestätigt, dass den Befragten der Schutz ihrer personenbezogenen Daten sehr wichtig ist. Weiterführend stellten die Forscher jedoch fest, dass für einen geringen Geldbetrag oder einen Komfortnutzen – Sprachassistenten o. Ä. – viele der Befragten unverhältnismäßig viele Daten preisgeben oder sogar ihre Passwörter verkaufen würden. Dies steht im Widerspruch zum allgemeinen Empfinden des Datenschutzes. Andere Studien konnten zeigen, dass Anwendungen zum Schutz der Bevölkerung oder bei Evakuierungen die größte Nutzerakzeptanz erfahren (Aloudat et al., 2014; Vrček et al., 2008).

Im Bereich der Liefer- und Zustelldienste werden viele Zustellende durch ihre Arbeitgeber per GPS observiert oder überwacht. Teilweise werden diese Daten auch den Kunden als Service zur Verfügung gestellt (ab 2020 bei DHL: Klasen & Edenhofer (2020) und bereits seit 2014 bei DPD: www.dpd.com). Die Studie von Ivanova et al. (2018) zu den Arbeitsbedingungen von Fahrradkurieren zeigt auf, dass die Standortdaten der einzelnen Kuriere

durch die Arbeitgeber analysiert werden und dadurch die individuelle Leistungsperformance der Kuriere erfasst wird. Diese wiederum hat einen Einfluss auf die Aufgabenverteilung.

Das Aufzeichnen und Auswerten von Standortdaten findet auch bei Privatpersonen statt. Beispielsweise verwendet der Kartendienstanbieter Google die Standortdaten seiner Nutzenden für die Stau- und Reisezeitprognose (Klanner & Ruhhammer, 2015). Durch den Gebrauch des Services zur Routenführung willigen die Nutzenden ein, dass der Anbieter die Standortdaten zur Auswertung verwenden darf. Damit ist eine Prognose der Verkehrsdichte sowie die Empfehlung alternativer Routen möglich. Vergleichbar ist dieses Vorgehen auch mit den im Fahrzeug integrierten Navigationsgeräten aller größeren Fahrzeughersteller (Klanner & Ruhhammer, 2015).

Im Jahr 2017 hat der Mobilfunkanbieter Telefónica Germany (o. D.) eine umfangreiche Analyse der Mobilfunkdaten seiner Kunden zur Rekonstruktion von Verkehrsflüssen im Allgemeinen und im Speziellen beim Pendlerverkehr durchgeführt. Anhand den mit dem jeweiligen Mobilfunkmasten verbundenen mobilen Endgeräten konnten detaillierte Bewegungsmuster abgeleitet werden.

Neben den vorwiegend standortbezogenen Systemen bieten auch Smartwatches, Tracking-Apps¹ und Soziale Netzwerke², in Kombination mit einem Smartphone, die Möglichkeit des Aufzeichnens und Archivierens von diversen personenbezogenen Daten. Beispiel sind hierfür das Aufzeichnen oder die Echtzeitverfolgung von Sportaktivitäten³. Ebenso ist die Erfassung von gesundheitsrelevanten Faktoren⁴ möglich. Auch Spiele zum Freizeitvergnügen, sogenannte *Location-based Games*, setzen vermehrt auf Standortdaten. Die Spielenden nehmen zum Ausführen des Spieles dabei am Straßenverkehr teil. Das Bekannteste und am weitesten verbreitete Spiel der letzten Jahre ist *Pokémon Go*⁵. Jedoch gibt es noch zahlreiche andere Spiele in diesem Segment.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Vernetzung und somit das Teilen von personenbezogenen Standortdaten bereits in der Gesellschaft etabliert ist. Viele alltägliche

¹ bspw. Komoot: www.komoot.de

² Facebook, LinkedIn, o. Ä.

³ bspw. Garmin: www.garmin.com

⁴ bspw. Apple EKG: www.apple.com

⁵ Im Jahr 2019 wurde das Spiel rund 55 Mio. Mal heruntergeladen und der Hersteller Niantic konnte zusätzlich noch einen Umsatzrekord verzeichnen. Deutschland liegt dabei auf Platz drei bei den Umsätzen. (Chapple, 2020)

Produkte und Services sind ohne die Nutzung dieser Daten gar nicht mehr möglich. Insbesondere wenn ein Smartphone zum Einsatz kommt, was laut Statistisches Bundesamt (2019a) nahezu jeder Haushalt in Deutschland besitzt. Dennoch gibt es eine Vielzahl an Nutzenden die sich dieses Umstands nicht bewusst sind.

2.3 Statistiken und Analysen von Unfällen

Der jährlich vom Statistischen Bundesamt (2019c) veröffentlichte Bericht zum Verkehr in Deutschland gibt einen Überblick, wie sich die gesamte Verkehrsstruktur und Verkehrssicherheit entwickelt hat. Die darin enthaltenen Zeitreihen bieten fortführend die Möglichkeit, zukünftige Entwicklungstrends abzuschätzen oder gezielte Maßnahmen gegen negative Trends einzuleiten. Im Jahr 2018 ereigneten sich, wie auch in den vorherigen Jahren, die meisten (69 %) der Verkehrsunfälle mit Personenschaden (bezogen auf alle am Verkehr teilnehmenden Personen) innerhalb von Ortschaften. Im Gegensatz dazu liegt in diesem Bereich die Anzahl von Verunglückten nur bei 30 % (Statistisches Bundesamt, 2019c). Im Vergleich zum Vorjahr ist die Anzahl der im Verkehr zu Tode gekommenen Personen im Jahr 2018 um 3 % gestiegen. Dabei wurden insgesamt 92.436 Unfälle (mit Personenschäden) mit Beteiligung eines Fahrradfahrenden dokumentiert. In 23.207 Unfällen (25 %) waren die Fahrradfahrenden die Hauptverursacher, bei 50.840 Unfällen (55 %) beteiligt und in 18.389 Fällen handelte es sich um Alleinunfälle (20 %). Hauptverursacher bei Unfällen mit Beteiligung eines Fahrradfahrenden war am häufigsten ein Personenkraftwagen (37.760 oder 74 %) gefolgt von einem anderen Fahrradfahrenden (6.476 oder 13 %). (Statistisches Bundesamt, 2019c, S. 99)

Die Betrachtung der Gruppe von fahradfahrenden Personen offenbart, dass die meisten tödlichen Verkehrsunfälle innerorts passieren (siehe Abbildung 2.1). Insbesondere der gravierende Anstieg tödlich verunglückter Fahrradfahrenden im Jahr 2018, mit 16,49 % gegenüber dem Vorjahr, ist alarmierend. Bezugnehmend auf die Gesamtheit aller verunfallten Menschen im Straßenverkehr entfallen auf die Gruppe der fahradfahrenden Personen 23,34 % der Verunglückten (leichte bis schwere Verletzungen) und 13,89 % der Getöteten. Aufgeteilt nach unterschiedlichen Altersgruppen (Statistisches Bundesamt, 2019c) birgt die

Gruppe der +65-Jährigen (31,9 % der Getöteten) ein besonders hohes Gefährdungspotenzial. Im Vergleich zum Vorjahr verzeichnet das Altersspektrum von unter 15-Jährigen die größte Zunahme der Getöteten (+ 29,5 %; 79 zu 61). Eine Untersuchung der Unfälle zwischen Pkw und Fahrradfahrenden konnte zeigen, dass die meisten Zusammenstöße in Kreuzungssituationen passieren, wenn die fahradfahrende Person von rechts (42 %) oder links (34 %) auf den Autofahrenden zufährt (Hummel & Lang, 2016). Die parallele Fahrt in gleiche Richtung, mit der Absicht des Pkw abzubiegen, stellt dabei die ungefährlichste Situation dar (11 %). Ferner passieren 80 % der Unfälle mit Fahrradbeteiligung bei Tageslicht (Statistisches Bundesamt, 2019c). Kritisch zu betrachten bei den offiziellen Statistiken ist, dass gerade bei der Erfassung von Fahrradunfällen eine sehr große Dunkelziffer vermutet wird (von Below, 2016, S. 65). Dies wird dadurch begründet, dass die Polizei nur bei schweren Unfällen oder bei Unklarheiten hinsichtlich des Unfallverursachers hinzugerufen wird. Folglich sind auch nur diese Unfälle statistisch erfasst. Am höchsten wird daher die Dunkelziffer bei Alleinunfällen eingeschätzt. Im Rahmen einer von der BAST durchgeführten Befragung (N = 2.768) von verunglückten Fahrradfahrenden in mehreren Krankenhäusern wurde der Versuch unternommen, die Dunkelziffer zu benennen. Auf Grundlage der erhobenen Daten wird die Dunkelziffer für Unfälle mit Verletzungen zwischen 58 – 88 % und für Alleinunfälle auf 88 – 96 % geschätzt (von Below, 2016, S. 71 f.).

Bezogen auf die Stadt und den Landkreis München sind insgesamt 26 Menschen im Jahr 2018 im Straßenverkehr tödlich verunglückt. Zehn der Verunglückten waren fahradfahrende Personen. Für München entspricht dies einer Steigerung zum Vorjahr von 100 %. Fünf der getöteten Fahrradfahrenden waren ohne Helm unterwegs und ebenfalls die Hälfte war über 65 Jahre alt. (Polizeipräsidium München, 2019)

2.4 Tätigkeiten und Verhaltensmuster des Menschen beim Führen eines Fahrzeuges

Dieses Unterkapitel grenzt die während des Führens eines Transportmittels möglichen Tätigkeiten von einander ab und weist auf die Besonderheiten von nicht sicherheitsrelevanten Tätigkeiten hin. Dazu wird das Model des Mensch-Maschine-System (MMS) nach Bubb,

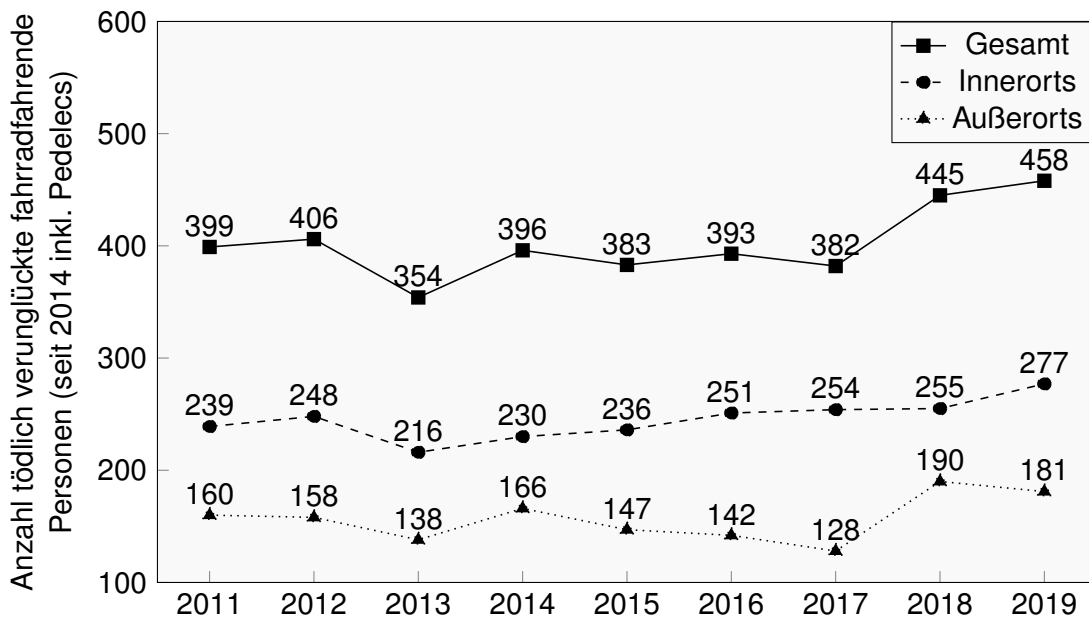


Abbildung 2.1: Übersicht der im deutschen Straßenverkehr getöteten Fahrradfahrenden in den Jahren 2011 – 2019; gegliedert nach der Ortslage (Statistisches Bundesamt, 2019c, 2020).

Bengler, Grünen et al. (2015, S. 17 ff.) zugrunde gelegt. Dabei beschreibt dieses Modell die Interaktion zwischen einem Menschen – fahrende Person – und einer Maschine – Fahrrad oder Pkw –, mit dem Ziel, eine bestimmte Aufgabe – Fortbewegung – unter den Einflüssen aus der Umwelt zu erreichen. Dabei ist die Belastung durch die Aufgabe sowie der Umwelt universell und nur die im Menschen wirkende Beanspruchung, welche aus der Belastung resultiert, ist individuell unterschiedlich. (Bubb, Bengler, Grünen et al., 2015)

2.4.1 Systematische Betrachtung der Tätigkeiten beim Fahren eines Fahrzeuges

Gemäß der Gliederung von Bubb, Bengler, Grünen et al. (2015) kann das gesamte Tätigkeitsspektrum, welches während des Führens eines Kraftfahrzeuges anfällt, in drei unterschiedliche Kategorien gegliedert werden: primäre, sekundäre und tertiäre Tätigkeiten. Bubb, Bengler, Grünen et al. (2015) beschreiben diese drei Ebenen ausschließlich für das Bedienen eines Kraftfahrzeuges. Allerdings kann diese Gliederung auch auf das Führen von nicht oder teil-motorisierten Fahrzeugen (z. B. Fahrräder) im Straßenverkehr heran-

gezogen werden. Zu beachten ist dabei jedoch, dass sehr wahrscheinlich die Verteilung der zur Verfügung stehenden physiologischen und psychologischen Ressourcen anders ausgeprägt ist als beim Führen eines Kraftfahrzeuges.

Die Tätigkeiten der primären Aufgaben gliedern sich in die Aufgaben der Navigation, der Führung und der Stabilisierung. Beim Autofahren ist dies überwiegend eine zweidimensionale Aufgabe. Durch die abweichende Fahrdynamik des Fahrrades gegenüber einem Pkw kommt noch eine weitere Komponente, das Halten des Gleichgewichts hinzu. Eine genauere differenzierte Betrachtung wird im Unterkapitel 3.2 vorgenommen. Die sekundären Tätigkeiten sind definiert als die der Fahraufgabe unterstützenden Prozesse. Im Kontext des Autofahrens sind dies Aktionen wie das Bedienen des Blinkers und das Reagieren auf Umwelteinflüsse (z. B. Betätigen des Scheibenwischers). Bezogen auf die Tätigkeiten während des Fahrradfahrens würde dies dem Anzeigen von Handzeichen zum Abbiegen oder das Betätigen der Klingel entsprechen. Alle nicht direkt mit der Fahraufgabe verbundenen Tätigkeiten gehören der tertiären Kategorie an und werden auch oftmals als Nebentätigkeiten bezeichnet. Charakterisiert sind diese Tätigkeiten dadurch, dass diese in erster Linie dem Komfort der Insassen dienen. Insbesondere im Kraftfahrzeug hat die Anzahl dieser Tätigkeiten in den letzten Jahren stark zugenommen. Wie aktuelle Verkehrsbeobachtungen (siehe Unterkapitel 2.4.2) aufzeigen, wird ebenfalls das Ausüben von Nebentätigkeiten beim Führen eines Fahrrades immer beliebter (de Waard et al., 2015; Huemer et al., 2019). Die zur Verfügung stehenden Möglichkeiten, sich während des Fahrradfahrens mit Nebentätigkeiten zu befassen, nehmen dabei kontinuierlich zu. Bauartbedingt sind zudem alle Pedelecs bereits mindestens mit einem einfachen Bordcomputer und HMI ausgestattet. In Abhängigkeit von der Ausstattungsvariante kann dieses HMI auch mit einer Navigationsfunktion oder weiterem Funktionsumfang ausgestattet sein⁶.

Alle diese Anzeigekonzepte führen dazu, dass die fahrradfahrenden Personen einer zusätzlichen Belastung ausgesetzt sind. Für die Gestaltung dieser Anzeigen ist zu untersuchen, ab wann die dadurch induzierte Ablenkung eine zu große Gefährdung für die Verkehrssicherheit darstellt. Demzufolge kann der Informationsgrad definiert werden, welcher während der Fahrt abgelesen werden kann. In diesem Zusammenhang hat auch die

⁶ z. B. Bosch Nyon <https://www.bosch-ebike.com/de/produkte/nyon/> (zuletzt abgerufen am 30.07.2019)

Art der Präsentation – auditiv, haptisch oder visuell – sowie der Zeitpunkt, in Abhängigkeit von der Dringlichkeit und des Verkehrsszenarios, einen Einfluss auf die Verkehrssicherheit. Im nachfolgenden Unterkapitel werden diese Aspekte eingehender betrachtet.

2.4.2 Ablenkung von der primären Fahraufgabe

Das Themenfeld der Fahrerablenkung wurde bisher vorwiegend in Bezug auf das Führen eines Pkws untersucht (Bengler, 2014; Bubb, Bengler, Grünen et al., 2015; Lipovac et al., 2017). Über die Auswirkungen von Nebentätigkeiten beim Fahrradfahren sind nur wenige Forschungserkenntnisse vorhanden (Ahlstrom et al., 2016; Stavrinou et al., 2018). Diesbezüglich bezieht sich auch die hier genannte Definition des Begriffes der *Fahrerablenkung* (engl. driver distraction) in erster Linie auf den Kraftfahrzeugsektor: „The diversion of attention away from activities critical for safe driving toward a competing activity, which may result in insufficient or no attention to activities critical for safe driving“ (Regan et al., 2011, S. 1776). Hingegen differenzieren Ranney et al. (2001) den Begriff nach den jeweiligen Modalitäten der Fahrenden, auf welche sich die Ablenkung auswirkt. Unterschieden wird dabei zwischen den vier Kategorien der visuellen, auditiven, biomechanischen und kognitiven Ablenkung. Bei seinem Multiple Ressourcen Model zur Verteilung von limitierten Wahrnehmungsressourcen verwendete Wickens (1984) einen vergleichbaren Ansatz. Im Gegensatz dazu gliedern Engström et al. (2013) das menschliche Verhalten in erlernte Schemata. Im Sinne von Engström et al. (2013) resultieren daher Ablenkungen aus der fehlerhaften Priorisierung von nicht sicherheitsrelevanten Schemata gegenüber von Schemata der primären Fahrtätigkeit.

Einig sind sich jedoch die meisten Wissenschaftler darin, dass Nebentätigkeiten während des Autofahrens eine Ablenkung verursachen. Dabei kann die Art der Ausprägung von Ablenkungen sehr vielseitig sein, was wiederum auch die Messung des Ablenkungsgrades sowie das aus der Ablenkung resultierende Gefahrenpotenzial stark beeinflusst (Bengler, 2014; Conti-Kufner, 2017; Strayer et al., 2013; Young, 2015). Beispielsweise verursacht die Verwendung eines Navigationsgerätes erst einmal eine zusätzliche Ablenkung – sekundäre und tertiäre Tätigkeit – von der primären Tätigkeit, jedoch führt der Informationsgewinn dazu, dass die Fahrenden bei der Findung der gewünschten Route und der Steuerung des

Fahrzeuges unterstützt werden. Durch das Reduzieren der visuellen Suche nach Straßenschildern oder Landmarkierungen werden mehr Ressourcen für die primäre Tätigkeit frei. Demzufolge kann eine zusätzliche Belastung auch zur Steigerung der Sicherheit beitragen. Nach dem Drei-Ebenen-Modell von Rasmussen (1983), mit Beachtung der drei Aufgaben bei der primären Fahraufgabe – Navigation, Führung und Stabilisierung –, zeigt sich, dass insbesondere die klassische Routenfindung in unbekanntem Gebieten (Aufgabe: Navigation; Verarbeitungsniveau: wissensbasiert) mehr Zeit bedarf (Bubb, Bengler, Grünen et al., 2015). Durch den gezielten Einsatz eines gut gestalteten HMI wird die Ablenkung verlagert und fällt dadurch geringer aus. Das bedeutet, dass in Abhängigkeit von der Verkehrssituation die relevanten Informationen den Nutzenden bereitgestellt und von diesen nach Bedarf abgerufen werden können. Zeitkritische Informationen sind nur für Warnungen in Gefahrensituationen (vgl. Bengler et al., 2018) akzeptabel. Wichtig für die Gestaltung von Anzeigekonzepten ist daher, dass diese eine gute Wahrnehmbarkeit, Unterbrechbarkeit und einen geringen Ablenkungseffekt aufweisen. Speziell für den Kraftfahrzeugsektor stehen dazu bereits etablierte internationale Richtlinien zur Gestaltung von Anzeige- und Bedienkonzepten (AAM; ESoP; JAMA; NHTSA) – siehe dazu Unterkapitel 2.5 – zur Verfügung.

Bezogen auf das Fahren anderer Fahrzeuge oder sogar der Teilnahme am Straßenverkehr ohne ein Transportmittel können diese Richtlinien zur Gestaltung und Evaluation nicht unmittelbar angewendet werden (Guth, 2017). Indes sind sowohl die Definition der Fahrerablenkung als auch die grundlegenden Erkenntnisse aus diesen Forschungsarbeiten auf den Anwendungsfall des Fahrradfahrens transferierbar. Dies zeigt sich durch die von de Waard et al. (2010), de Waard et al. (2014) und Ahlstrom et al. (2016) durchgeführten Untersuchungen. De Waard et al. (2010) untersuchten die Auswirkungen von Nebentätigkeiten beim Fahrradfahren im Rahmen eines abgesicherten Feldversuchs. Die dabei gewonnenen Ergebnisse sind vergleichbar mit den Erkenntnissen aus der Forschung der Fahrerablenkung im Automobilbereich. Visuelle und manuelle Aufgaben (z. B. Textnachrichten schreiben) führen zu einer Verringerung der Fahrleistung und steigern somit das Unfallrisiko (de Waard et al., 2014).

Ahlstrom et al. (2016) wiesen nach, dass auch beim Fahrradfahren ein Unterschied bei der Blickstrategie zwischen System initiierten und von den Nutzenden selbstgesteuerten

Aufgaben besteht. Selbstgesteuerte Aufgaben werden von den Fahrradfahrenden gezielt mit der primären Fahraufgabe abgestimmt. Sie werden somit geplant und bewusst ausgeführt. Für dieses strategische Vorgehen sind weniger Blicke für eine Tätigkeit notwendig. Das beobachtete Verhalten ist vergleichbar mit den Erkenntnissen beim Autofahren (Wandtner et al., 2016). Stelling-Konczak et al. (2018) untersuchten in einem Feldversuch den Einfluss von auditiver Ablenkung während des Fahrradfahrens auf das Blickverhalten von jugendlichen Fahrradfahrenden. Die Ergebnisse legen nahe, dass ein großer Teil der Probanden eine Leistungseinbuße hatte, jedoch dieser Effekt nicht signifikant wurde.

Verkehrsbeobachtungen von Fahrradfahrenden zeigen auf, dass rund ein Viertel aller fahrradfahrenden Personen während des Fahrens mit Nebentätigkeiten beschäftigt sind – 22,7 % in Huemer et al. (2019); 31,2 % in Wolfe et al. (2016); 27,6 % in Terzano (2013). Die Observation von de Waard et al. (2015) fällt mit rund 3 % gesamter Ablenkung deutlich niedriger aus als die anderen Studien. In dieser Erhebung wurden auch nur die Nebentätigkeiten Texten und Telefonieren protokolliert. Die Verkehrsbeobachtung von de Waard et al. (2015) stellte eine Verlagerung bei der Art der Nutzung eines Mobiltelefons zwischen den Jahren 2008 und 2013 fest. Das Telefonieren rückte deutlich in den Hintergrund (von 2,2 % in 2008 zu 0,7 % in 2013), dafür nahm das Texten erheblich zu (2008: 0,6 %; 2013: 2,3 %). In Summe ist das Nutzungsverhalten des Mobiltelefons jedoch nahezu konstant geblieben. Die Verlagerung von einer auditiven-kognitiven Nebentätigkeit hin zu einer visuellen-manuellen Nebentätigkeit ist sehr bedenklich. Nach Wickens (1984) greifen diese tertiären Tätigkeiten auf die gleichen Ressourcen wie die primäre Fahraufgabe zurück. Bezogen auf die Verwendung eines Mobiltelefons beim Fahrradfahren kommen andere Beobachtungsstudien zu vergleichbaren Ergebnissen – 2 % in Huemer et al. (2019); 13,4 % in Wolfe et al. (2016); 3,5 % in Terzano, 2013. In diesem Kontext gaben bei einer Befragung 17 % an, dass sie ein Smartphone beim Fahrradfahren verwenden (Goldenbeld et al., 2012). Neben dem Telefonieren und Texten wurde auch noch das Hören von Musik dokumentiert – 13,1 % in Huemer et al. (2019); 17,7 % in Wolfe et al. (2016); 9,1 % in Terzano (2013). Je nach Kopfhörerart kann der auditive Sinneskanal unterschiedlich stark beeinflusst oder sogar vollständig blockiert werden (de Waard et al., 2011) – Over-Ear Kopfhörer ggf. noch mit Geräuschunterdrückung.

Weiterführend konnten Huemer et al. (2019) eine Korrelation zwischen dem Ausüben von Nebentätigkeiten und dem nicht tragen eines Fahrradhelmes feststellen. Basierend auf diesen Daten schlussfolgerten die Autoren, dass ein fehlendes Gefahrenbewusstsein der entsprechenden Personen die Hauptursache für ihr jeweiliges Verhalten ist. Allgemein ist bei der Ausführung von visuellen-manuellen Nebentätigkeiten ein Kompensationseffekt zu erkennen (Ahlstrom et al., 2016; de Waard et al., 2014; Goldenbeld et al., 2012). So wird beispielsweise während der Bedienung des Smartphones die Geschwindigkeit reduziert oder der Abstand zum Bordstein erhöht (unabhängig von der Art der Straße). Diese beiden Effekte kompensieren dabei aber nicht zwangsläufig die Sicherheitseinbußen, welche durch eine Nebentätigkeit verursacht werden (de Waard et al., 2015).

2.5 Gestaltung und Evaluation von HMIs im Straßenverkehr

Für die Entwicklung von Produkten für den Einsatz im Straßenverkehr sowie auch speziell für Softwareprodukte gibt es je nach Anwendungsbereich unterschiedliche gesetzliche Vorgaben, selbst verpflichtende Richtlinien oder auch Gestaltungsempfehlungen. Der jeweilige Entwicklungs- und Evaluationsprozess sollte zusätzlich noch mit einem Vorgehensmodell gesteuert werden (Rudlof, 2006, S. 108 ff.). Ein speziell auf die Gestaltung von Softwareprodukten ausgerichtetes Verfahren ist der Prozess zur Gestaltung gebrauchstauglicher interaktiver Systeme der ISO/FDIS 9241-210 (siehe Abbildung 2.2), welcher an den allgemeinen User Centered Design Prozess (UCDP) angelehnt ist. Die nachfolgende Arbeit ist nach diesem Verfahren konzipiert.

2.5.1 Allgemeine Gestaltungsrichtlinien und -empfehlungen für HMIs im Fahrzeuginnenraum

Der deutsche Gesetzgeber regelt den Umgang mit Nebentätigkeiten für alle Fahrzeugführenden Personen im Straßenverkehr im § 23 StVO. Speziell ist darin definiert, dass

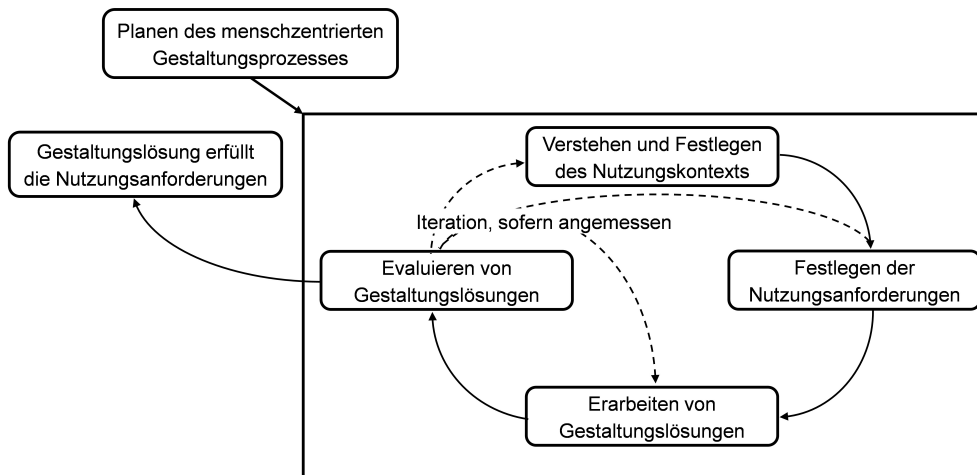


Abbildung 2.2: Prozess zur Gestaltung gebrauchstauglicher interaktiver Systeme ISO/FDIS 9241-210.

„[w]er ein Fahrzeug führt, darf ein elektronisches Gerät, das der Kommunikation, Information oder Organisation dient oder zu dienen bestimmt ist, nur benutzen, wenn

1. hierfür das Gerät weder aufgenommen noch gehalten wird und
 2. entweder
 - a) nur eine Sprachsteuerung und Vorlesefunktion genutzt wird oder
 - b) zur Bedienung und Nutzung des Gerätes nur eine kurze, den Straßen-, Verkehrs-, Sicht- und Wetterverhältnissen angepasste Blickzuwendung zum Gerät bei gleichzeitig entsprechender Blickabwendung vom Verkehrsgeschehen erfolgt oder erforderlich ist.“
- (§ 23 Absatz 1a StVO)

Bezogen auf die Gestaltung von HMIs gibt der gesetzliche Rahmen somit vor, dass ein Gerät nicht in der Hand gehalten werden darf und nur kurze Blickzuwendungen erlaubt sind. Gerade der visuelle Aspekt ist sehr unpräzise. Die Dauer einer kurzen Blickzuwendung wird dort nicht eingehender spezifiziert. Im internationalen Vergleich haben nahezu alle Länder ähnliche gesetzliche Vorgaben. Eine Zusammenfassung ist Mwakalonge et al. (2014) zu entnehmen.

Im Unterkapitel 2.4.2 zur Fahrerablenkung wurden bereits einige Aspekte aufgezeigt, welche die Interaktion des Menschen mit einer Maschine beeinflussen. Gerade für die Gestaltung von HMIs im Pkw haben die Hersteller selbstverpflichtend an den internationalen Richtlinien mitgewirkt – siehe dazu AAM; ESoP; JAMA; NHTSA. Diese beinhalten sowohl Gestaltungsempfehlungen als auch Methoden der Evaluation. Ein sehr häufiges Instrument

ist die Analyse des Blickverhaltens – Eye-tracking und Okklusion. Ergänzt werden die Guidelines durch Standards der ISO – Dialoggestaltung: EN ISO 15005, Blickverhalten: ISO 15007 und visuellen Darstellung: DIN EN ISO 15008. Darin beschrieben sind sowohl Gestaltungsempfehlungen als auch Grenzwerte zur Evaluation von Pkw-HMIs. Neben diesen speziell für den Einsatz im Pkw definierten Normen existieren auch allgemeingültige Gestaltungsempfehlungen für HMIs. Goldstein (2008) definiert neun Gestaltprinzipien – bspw. Prinzip der Nähe – und Nielsen (1994a) postuliert zehn Usability-Heuristiken, welche beide international anerkannt sind. Unabhängig vom Einsatz des HMIs ist die Kombination von kurz- und langwelligem Licht – z. B. blau und rot – zu vermeiden, da dies zu chromatischer Aberration führt.

2.5.2 Dimensionen der Evaluation von HMIs

In diesem Unterkapitel sind die vier relevanten Dimensionen der Evaluation – Usability, Suitability, User Experience und Akzeptanz – definiert. Weiterführend sind Möglichkeiten der methodischen Umsetzung dargestellt. Aus den vier Dimensionen ergeben sich unterschiedliche Anforderungen an die Gestaltung eines HMIs. Dabei besitzen diese Anforderungen in Teilen eine gemeinsame Schnittmenge, führen aber auch in gewissen Aspekten zu Zielkonflikten.

Usability Die Usability oder im Deutschen Gebrauchstauglichkeit ist definiert als das „Ausmaß, in dem ein System, ein Produkt oder eine Dienstleistung durch bestimmte Benutzer in einem bestimmten Nutzungskontext genutzt werden kann, um bestimmte Ziele effektiv, effizient und zufriedenstellend zu erreichen“ (DIN EN ISO 9241-11, S. 9). Die Gebrauchstauglichkeit beschreibt somit die Interaktion eines Betrachtungsgegenstandes mit einer Person, basierend auf den Zieldimensionen der Effektivität, Effizienz und Zufriedenheit. Dabei beschreibt die Zieldimension der Effektivität die „Genauigkeit und Vollständigkeit, mit denen Benutzer bestimmte Ziele erreichen“ (DIN EN ISO 9241-11, S. 11). Die Effizienz spiegelt die „eingesetzte[n] Ressourcen im Verhältnis zu den erreichten Ergebnissen“ (DIN EN ISO 9241-11, S. 11) wider. Die Zufriedenheit der Nutzenden beschreibt das „Ausmaß der Übereinstimmung der physischen, kognitiven und emotionalen Reaktionen des Benutzers,

die aus der Benutzung eines Systems, eines Produkts oder einer Dienstleistung resultieren, mit den Benutzererfordernissen und Benutzererwartungen“ (DIN EN ISO 9241-11, S. 11). Zur Erfassung des Ausmaßes der Usability eines Systems stehen mehrere unterschiedliche Methoden (Nutzertests, Guidelines, Experten Workshops, Fragebögen, o. Ä.) zur Verfügung (Richter & Flückiger, 2016). In einem frühen Stadium der Entwicklung können Experte-valuationen dazu genutzt werden, um die Usability eines Systems zu bewerten und Verbesserungspotenziale zu identifizieren. Eine dazu geeignete analytische Methode ist der *Cognitive Walkthrough* (C. Lewis & Wharton, 1997). Diese aufgabenbezogene Methode schätzt bereits frühzeitig die intuitive und nicht angeleitete Erlernbarkeit für die späteren Nutzenden ab. Anhand der von C. Lewis & Wharton (1997) genannten vier Fragen kann eine sogenannte Erfolgs- und Misserfolgsstory über die Verwendung eines Systems beschrieben werden. Mithilfe von dieser Story kann das Optimierungspotenzial der jeweiligen Systeme deklariert werden. Im Gegensatz zu dem aufgabenbezogenen *Cognitive Walkthrough* wird bei der Methode der *heuristischen Evaluation* ein qualitativer Ansatz verfolgt. Dabei wird überprüft, ob bestehende Designrichtlinien erfüllt werden. In der DIN EN ISO 9241-110 sind dazu sehr allgemein die Grundsätze der Dialoggestaltung definiert. In der Praxis finden die 10-Usability-Heuristiken von Nielsen (1994a) häufiger Verwendung (vgl. Tabelle 5.6). Zur Messung des Grades der Gebrauchstauglichkeit von Prototypen kann der *System Usability Scale (SUS)* Fragebogen von Brooke (1996) herangezogen werden. Neben seiner unkomplizierten Anwendung besitzt dieser ein hohes Maß an Validität. Für die Interpretation des SUS-Scores hat sich die Einstufung von Bangor et al. (2009) international bewährt. Weiterführend kann nach der Verwendung eines Systems durch die Probanden der *Post-Study-System-Usability-Questionnaire (PSSUQ)* zur Messung der Benutzerfreundlichkeit sowie der Gebrauchstauglichkeit verwendet werden (J. R. Lewis, 2002).

User Experience Das Benutzererlebnis – engl. User Experience (UX) – ist definiert als die „Wahrnehmungen und Reaktionen einer Person, die aus der tatsächlichen und/oder der erwarteten Benutzung eines Systems, eines Produkts oder einer Dienstleistung resultieren“ (DIN EN ISO 9241-11, S. 12). Die UX und die Usability werden häufig gemeinsam betrachtet, da diese thematisch sehr eng beieinanderliegen. Bei der Usability wird vorwiegend eine

funktionsorientierte Betrachtung angewendet, wohingegen bei der UX auch die Emotionen bei der Anwendung der Nutzenden sowie die Ästhetik des wahrgenommenen Designs Beachtung finden (Richter & Flückiger, 2016). Zur Messung der UX existieren eine Vielzahl an Methoden (Tullis & Albert, 2013). Der *AttrakDiff 2* Fragebogen von Hassenzahl et al. (2003) hat sich dabei als ein reliables Instrument bewiesen.

Suitability Die Suitability – im deutschen Eignung oder Straßenverkehrseignung – beschreibt den „Grad [der Eignung], in welchem der TICS [Verkehrsinformations- und -regelsysteme]-Gebrauch unter Berücksichtigung der Fahrumgebung und der Kompatibilität mit der primären Fahraufgabe angemessen ist“ (DIN EN ISO 17287, S. 6). Für die Bewertung der Vereinbarkeit eines TICS mit der Fahraufgabe werden in der DIN EN ISO 17287 keine spezifischen Kriterien definiert, sondern auf die EN ISO 15005 zur ergonomischen Dialoggestaltung für Fahrerinformations- und Assistenzsysteme und im speziellen für die visuelle Informationsdarstellung im Fahrzeuginnenraum auf die DIN EN ISO 15008 verwiesen. Der Grad der Eignung eines Systems kann mit objektiven Messmethoden validiert werden. Die NHTSA (2013) beschreibt einen standardisierten Fahrsimulatorversuch mit Eye-Tracking Verfahren zur Evaluierung von HMIs im Pkw Segment. Dabei werden die erhobenen Daten mit festen Grenzwerten verglichen. Die spezifische Anwendung ist beispielsweise in Winzer et al. (2018) und Schambeck (2018) nachzulesen. Zur Bewertung der Vereinbarkeit eines TICS mit der primären Fahraufgabe kann die visuelle Beanspruchung und Unterbrechbarkeit einer Aufgabe mit der Okklusionsmethode (ISO 16673) gemessen werden (Bubb, Bengler, Lange et al., 2015). Die Methode ist unkompliziert in der Anwendung und überprüft auf valide und reliabele Weise die Qualität der Ablesbarkeit von Informationen mit kurzen definierten Blickzuwendungszeiten (Baumann et al., 2004). Im Allgemeinen kann die Suitability auf unterschiedliche Arten bewertet werden. Häufig werden dazu Probandenstudien, Labormessungen, Feldtests, Expertenbeurteilungen oder Spezifikationsanalysen herangezogen.

Akzeptanz Die Messung der Akzeptanz von Nutzenden, hinsichtlich neuartiger Technologien im Kontext des Straßenverkehrs, ist ein sehr komplexes Konstrukt (Regan et al., 2014). Beeinflusst wird die Akzeptanz durch den relativen Vorteil eines Systems gegenüber einem

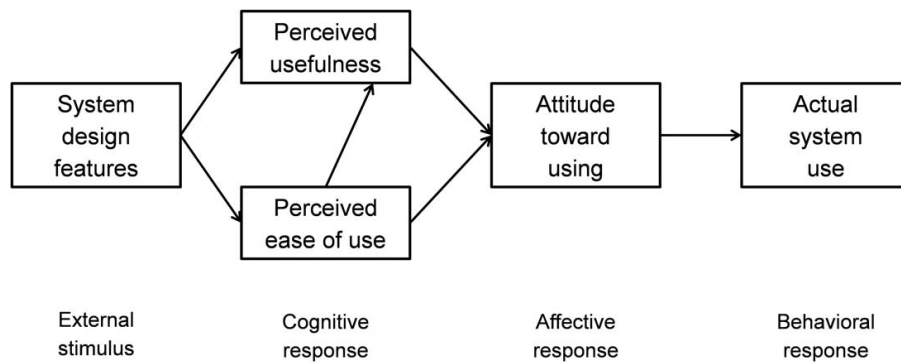


Abbildung 2.3: Technology Acceptance Model (in Anlehnung an Davis, 1993).

anderen System, die Vereinbarkeit mit sozialen Normen, die Leichtigkeit der Anwendung sowie das Erlernen des Umgangs, die Möglichkeit, die neuartige Technologie zu erproben und nicht zuletzt auch die Abwägung des Verhältnisses von Kosten und Nutzen für die Nutzenden (Regan et al., 2014). Der Begriff der Akzeptanz lässt sich definieren als „(...) the degree to which an individual intends to use a system and, when available, to incorporate the system in his/her driving“ (Adell, 2009, S. 31). Die vielseitigen Facetten der Akzeptanz machen die zuverlässige Messung zu einer Herausforderung. Um die Akzeptanz abzubilden gibt es mehrere Modellansätze. Davis (1986) definiert das Technology Acceptance Model (TAM) zur Messung der Akzeptanz einer Technologie durch die jeweils vorgesehenen Nutzenden. Das TAM (vgl. Abbildung 2.3) besagt, dass die Einstellung zur Verwendung einer Technologie maßgeblich durch zwei Faktoren beeinflusst wird. Entscheidend dabei ist die wahrgenommene Benutzerfreundlichkeit (engl. Perceived Ease of Use) und die wahrgenommene Nützlichkeit (engl. Perceived Usefulness) eines Systems. Dabei ist zu beachten, dass die wahrgenommene Nützlichkeit auch durch die Benutzerfreundlichkeit beeinflusst wird, jedoch nicht umgekehrt (Davis, 1993). Zu kritisieren ist, dass der Anwendungsfokus bei der Entwicklung auf Technologien im Office Bereich lag. Bei der Verwendung einer Technologie im Straßenverkehr können weitere Faktoren einen Einfluss ausüben. Diesbezüglich haben Osswald et al. (2012) das CTAM speziell für den Anwendungsfall im Straßenverkehr entwickelt. Dieses basiert weitestgehend auf der Unified Theory of Acceptance and Use of Technology (UTAUT) von Venkatesh et al. (2003), welches eine Synthese verschiedener Modelle, unter anderem auch dem TAM von Davis (1993) darstellt. Osswald et al. (2012)

erweiterten das UTAUT Model (siehe Abbildung 2.4 grau hinterlegte Faktoren) um weitere vier Faktoren und validierten dieses im Kontext des Autofahrens.

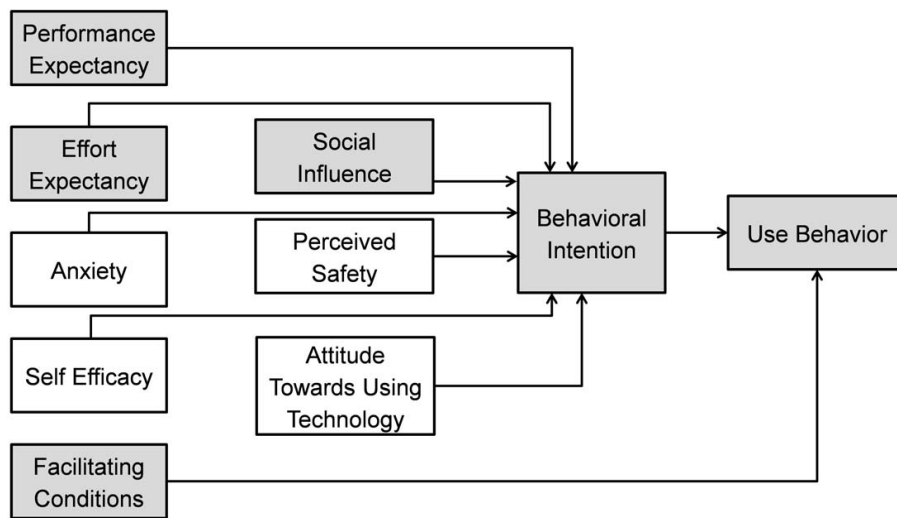


Abbildung 2.4: Car Technology Acceptance Model (in Anlehnung an Osswald et al., 2012; die grau hinterlegten Faktoren entstammen dem UTAUT).

2.5.3 Das Warndilemma

Unterschieden werden muss zwischen informierenden Hinweisen und Warnungen. Informierende Hinweise haben keinen Einfluss auf die Verkehrssicherheit – bspw. Richtungsanweisungen eines Navigationsgerätes – (S. Winkler et al., 2018). Als Warnung wird eine Information eingestuft, wenn diese eine gewisse zeitliche Dringlichkeit und einen inhaltlichen sicherheitsrelevanten Aspekt erfüllt. Die Einstufung des genauen Zeitpunktes einer kritischen Information ist dabei nicht immer einheitlich. So wird von Götze (2018) eine Warnung bei Time-to-Collision (TTC) $\leq 2,5$ s ausgegeben, wohingegen bei Fecher & Hoffmann (2015) eine Zeitdifferenz von 2 s angewendet wird. Bezüglich des Zeitpunktes des Aufführens eines Warnhinweises ergibt sich ein Zielkonflikt. Fecher & Hoffmann (2015) beschreiben diesen Zielkonflikt darin, dass eine Warnung so früh wie möglich übermittelt werden sollte, wenn diese jedoch zu früh stattfindet, besteht die Gefahr, dass sich die potenzielle kritische Situation beim Erreichen des Punktes bereits wieder aufgelöst haben kann. Dadurch wurde in der Wahrnehmung des Nutzens eine Fehlwarnung ausgesprochen, was die Nutzenden verunsichert oder sogar zur Ablehnung eines Systems führen

kann. Daher besteht die Herausforderung, den spätestmöglichen Zeitpunkt der Warnung im Verhältnis zu Fehlwarnungen abzuschätzen und so einen geeigneten Zeitpunkt für die Warnung zu finden. Um eine angemessene Reaktion des Fahrers sicherzustellen, ist die Lenkung der Aufmerksamkeit auf das entsprechende Event sowie das richtige Herstellen eines direkten Bezuges zur Information wichtig. Damit ist neben dem Zeitpunkt auch die Art der Handlungsempfehlung und des spezifischen Ortes, an dem diese ausgeführt werden soll, ein weiterer wichtiger Aspekt eines Warnhinweises (Götze, 2018; Petermann-Stock & Rhede, 2013).

2.5.4 Limitationen für den Zweiradbereich

Der Forschungsbericht des Projektes UR:BAN (Bengler et al., 2018) sowie auch die bereits aufgezeigte Literatur legen nahe, dass noch viel Forschungsbedarf zur Verkehrssicherheit von Zweiradfahrenden und insbesondere von Fahrradfahrenden besteht (Ahlstrom et al., 2016; Guth, 2017). So sind aktuell nur sehr wenige Studien zu finden, welche sich grundlegend mit dem Einfluss von Nebentätigkeiten auf die Verkehrssicherheit befassen (vgl. Abschnitt 2.4.2). Im Bereich der Feldstudien sind bereits ein paar Ergebnisse publiziert worden (Ahlstrom et al., 2016; de Waard et al., 2011; de Waard et al., 2014; de Waard et al., 2017; Nygårdhs et al., 2018; Stelling-Konczak et al., 2018). Diese deuten daraufhin, dass sich Nebentätigkeiten analog wie beim Pkw auswirken. Herausfordernd bei Durchführung von Feldversuchen ist die ethische Vertretbarkeit, dass Probanden bewusst in potenziell gefährliche Situationen gebracht werden. Das Risiko des Verunfallens von Probanden, auch ohne Fremdeinwirkung, ist sehr hoch und nahezu nicht abzusichern. Für Forschungsarbeiten mit Probanden in einem Fahrsimulator fehlt es aktuell noch an validen Fahrradsimulatoren. Zwar gibt es bereits mehrere Simulatoren – bspw. Dialynas et al., 2019; Keler et al., 2018; Powell et al., 2018; Surges, 2019 – und diese werden auch kontinuierlich weiterentwickelt, jedoch wird bisher die besondere Fahrdynamik des Fahrrades im Vergleich zu einem Pkw vernachlässigt (Dozza & Fernandez, 2014; Gressmann, 2002). Eben dieser Aspekt trägt erheblich zum Fahrverhalten eines Fahrrades bei. Eine weitere Herausforderung für die Simulation ist die von Fahrradfahrenden verwendete Verkehrsinfrastruktur. Diese ist deutlich vielseitiger als für Pkws (Jurczok & Borgstedt, 2018). Eine weitere Mög-

lichkeit der Untersuchung des Fahrverhaltens sind Naturalistic Driving Studies (NDSn) – bspw. Dozza et al., 2015; Dozza & Fernandez, 2014; Dozza & Werneke, 2014; Strauss, 2015; Tivesten & Dozza, 2014. In den NDSn werden die Fahrräder unter anderem mit einem GPS-Gerät oder Smartphone ausgestattet. Dies ermöglicht zwar eine teilweise Analyse des mesoskopischen Verhaltens⁷ im Straßenverkehr, jedoch sind Rückschlüsse auf ein detailliertes mikroskopisches Verhalten⁸ noch nicht möglich (Dozza & Fernandez, 2014).

Aus der Abwesenheit grundlegender Forschungsarbeiten zur Fahrerablenkung, speziell für Fahrradfahrende, ist auch eine direkte Anwendung der aus dem Automobilsektor bekannten Richtlinien und Guidelines⁹ nicht zielführend. Selbst bei dem Versuch der Übertragung der Guidelines vom Pkw auf Motorräder schlussfolgerte Guth (2017), dass die physischen und psychischen Belastungen des Motorradfahrens höher sind und somit eine Übertragung nicht möglich ist. Beim Fahren eines Fahrrades kommt im Vergleich zum Motorrad noch die Belastung der Muskelkraft zur Fortbewegung hinzu. Diese unterliegt zudem noch der konditionellen physischen Ermüdung, in Abhängigkeit von der Fahrdauer sowie den Umwelteinflüssen der Fahrbahnbeschaffenheit¹⁰ und des geografischen Terrains (Doyle, 1987; Vansteenkiste et al., 2014; Vansteenkiste et al., 2017). Vansteenkiste et al. (2014) haben festgestellt, dass bei einer Verschlechterung des Fahrbahnbelages die Fahrradfahrenden ihr Blickverhalten adaptieren und deutlich kurzsichtiger fahren, jedoch ihre Geschwindigkeit beibehalten. Damit sind insbesondere die in den Guidelines aufgeführten Grenzwerte der Methoden zur Evaluation nicht beim Fahrrad anwendbar. Womit die Absicherung der Straßenverkehrseignung von HMIs im Zweiradbereich nicht möglich ist.

Für die Gestaltung kann damit nur auf die allgemeingültigen Empfehlungen der Usability, Suitability und User Experience zurückgegriffen werden. Ferner sind die sich unter anderem daraus ableitenden allgemeinen ergonomischen Gestaltungskriterien sowie die Akzeptanz der Nutzenden weitere wichtige Faktoren. Im folgenden Kapitel wird die Verkehrssicherheit von Fahrradfahrenden näher betrachtet.

⁷ Das mesoskopische Verhalten ist eine Mischform aus makroskopischen und mikroskopischen Faktoren. Es werden auf Basis zusammenhängender Netze und regionaler Verkehrsflüsse individuelle Verkehrsteilnehmer beschrieben (Dallmeyer, 2014).

⁸ Beschreibung des MMS eines einzelnen Verkehrsteilnehmers auf Basis von physikalischen Kenngrößen.

⁹ AAM, 2006; ESoP, 2008; JAMA, 2004; NHTSA, 2013

¹⁰ Der Untergrund (bspw. Asphalt oder Waldweg) sowie der Zustand der Wege.

3 Verkehrssicherheit von Fahrradfahrenden

Für den Begriff der Verkehrssicherheit gibt es keine einheitliche Definition, da die Bedeutung in den meisten Fällen als intuitiv angenommen wird. Dennoch kann der Begriff der Verkehrssicherheit im Allgemeinen verstanden werden als „ein Kompositum aus *Verkehr* und *Sicherheit* und bezeichnet dadurch die Freiheit von unvermeidbaren Risiken und Gefahren bei der Ortsveränderung von Personen oder Sachgütern (Verkehrsobjekte), die beispielsweise in Verkehrsmitteln unter Einbezug der Verkehrsinfrastruktur und Verkehrsorganisation transportiert werden“ (Schnieder & Schnieder, 2013, S. 74).

Dieses Kapitel befasst sich vorwiegend mit dem Transportmittel des Fahrrades sowie der Sicherheit der Nutzenden. Dazu wird im Folgenden das Mobilitätsverhalten von Fahrradfahrenden im Speziellen sowie im Verhältnis zu anderen Verkehrsmitteln und -teilnehmenden betrachtet. Da insbesondere für den Pkw ein umfangreiches Wissen bezüglich der Gestaltung von HMIs in Abhängigkeit von der Fahraufgabe vorhanden ist, wird diese als Basis und Referenz herangezogen. Darauf aufbauend werden die Spezifika des Ausübens der primären Fahraufgabe beim Fahrrad erläutert und ins Verhältnis zum Pkw gesetzt. Im dritten Abschnitt werden bestehende Maßnahmen zur Steigerung der Verkehrssicherheit kategorisiert und abwägend betrachtet.

3.1 Fahrradmobilität

Zur Erlangung eines besseren Verständnisses, wie das Mobilitätsverhalten der deutschen Bevölkerung ist, führte im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) das Institut für angewandte Sozialwissenschaften in den Jahren 2002 (N = 53.488), 2008 (N = 60.713) und 2017 (N = 316.361) eine bundesweite Befragung von

privaten Haushalten durch (Nobis & Kuhnimhof, 2019). Für die alltägliche Mobilität hat das Fahrrad immer mehr an Bedeutung gewonnen. Im Schnitt besitzt nahezu jede Person in Deutschland ein Fahrrad – 0,93 Fahrräder pro Kopf inkl. E-Bikes; Statistisches Bundesamt (2019b). Die Betrachtung der durchschnittlichen Entwicklung der Fahrradfahrenden im Jahr 2017 zeigt auf, dass die Anzahl der zurückgelegten Wege (2,4 pro Tag; - 4 % zu 2002) gesunken ist und die Fahrleistung (9,3 km pro Tag; + 16 % zu 2002) deutlich zugenommen hat (Nobis, 2019). Insbesondere in urbanen Gebieten wird immer häufiger das Fahrrad verwendet. Allgemein ist eine große Spannweite zwischen den unterschiedlichen Städten, Regionen und Bundesländern zu verzeichnen. (Nobis, 2019; Nobis & Kuhnimhof, 2019)

Die Absatzzahlen von Fahrrädern (mit und ohne Motor) sind in Deutschland im Jahr 2019 um 3,11 % gestiegen. Im Detail ist der Absatz vom klassischen Fahrrad dabei jedoch im Vergleich zum Jahr 2018 um 7,81 % gesunken. Im Gegensatz dazu ist der Absatz von E-Bikes um 38,77 % zum Vorjahr gestiegen. Im Jahr 2018 konnte ebenfalls bereits ein Absatzplus von rund 36 % erreicht werden. Damit besitzen E-Bikes einen Marktanteil von knapp 31,5 %, welcher nach mittelfristiger Schätzung auf 50 % ansteigen kann. (Eisenberger, 2019, 2020)

Der *Modal Split* beschreibt die prozentualen Personenkilometer (Verkehrsleistung) verteilt nach den Hauptverkehrsmitteln. Dieser ist für die beiden Erhebungszeitpunkte für kürzere Distanzen (bis 10 km) für die Metropolen sowie für Kleinstädte und Dörfer im ländlichen Raum in Abbildung 3.1 dargestellt. Innerhalb des ländlichen Raumes haben sich in den 15 Jahren geringere Änderungen ergeben. Der Pkw ist weiterhin das wichtigste Verkehrsmittel. Für den urbanen Verkehrsraum in Metropolen hingegen sind Veränderungen über die Zeit ersichtlich. In den vier Distanzkategorien bis 10 km hat das Fahrrad an Bedeutung gewonnen. Insbesondere im Distanzbereich von 5 bis 10 km hat sich der Anteil verdoppelt. (Kuhnimhof et al., 2019)

Weiterführend ist auffällig, dass fahradfahrende Personen im urbanen Verkehrsraum sehr multimodal unterwegs sind – Fahrrad & Pkw: 20 %; Fahrrad & öffentlicher Personennahverkehr (ÖPNV): 5 %; alle drei: 4 %. Hingegen gibt es die sehr große Gruppe der Pkw-Nutzenden (45 %), welche ausschließlich mit diesem Verkehrsmittel unterwegs sind – die reine Fahrradgruppe macht 5 % aus. (Nobis, 2019)

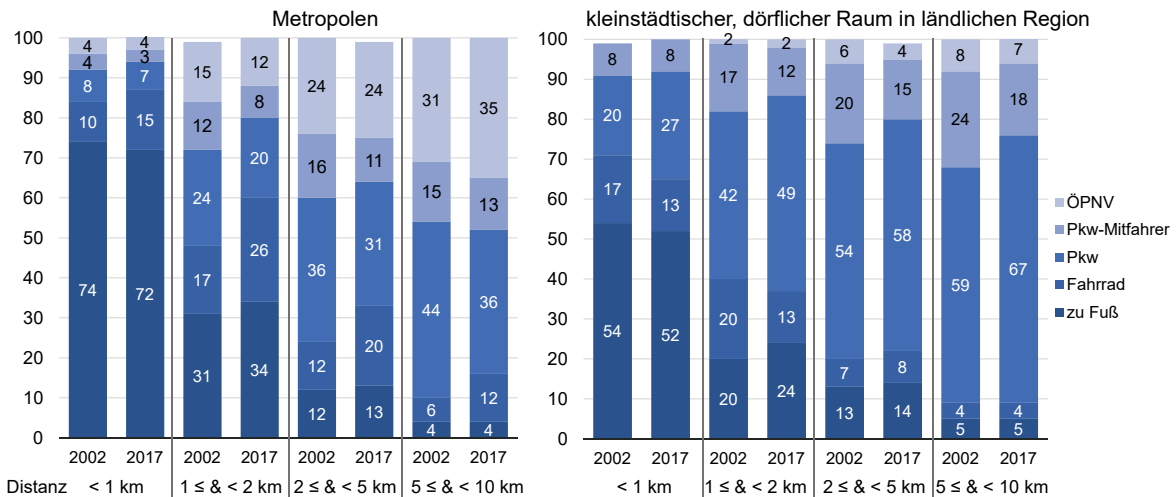


Abbildung 3.1: Entwicklung des Modal Split in Abhängigkeit von der Distanz der Strecken und des Raumtyps; Abweichung durch Rundungen (Kuhnimhof et al., 2019).

Die mittlere Geschwindigkeit im urbanen Verkehrsraum ist stark schwankend zwischen den unterschiedlichen Studien. Dozza & Werneke (2014) gibt eine durchschnittliche Geschwindigkeit von 13,6 km/h an. Die als Musterstadt für Fahrradmobilität geltende Stadt Kopenhagen berichtet von einer mittleren Geschwindigkeit von 16,3 km/h (Kabell, 2016). Schleinitz et al. (2017) untersuchten die Geschwindigkeit von Fahrradfahrenden und stellten fest, dass diese stark vom Alter und dem befahrenen Terrain abhängig ist. Junge Menschen fahren deutlich schneller als Ältere. Über alle Altersgruppen und Versuchsbedingungen hinweg ergab sich eine durchschnittliche Geschwindigkeit von 15,3 km/h (Schleinitz et al., 2017).

3.2 Unterschiede bei der primären Fahraufgabe eines Fahrrades im Vergleich zum Kraftfahrzeug

Als Fahrrad wird ein Fahrzeug bezeichnet, welches meistens aus zwei hintereinander angeordneten Rädern besteht und durch Muskelkraft fortbewegt wird (§ 63a Absatz 1 StVZO). Die Fähigkeit, Fahrrad zu fahren ist nahezu weltweit verbreitet und die meisten Kinder erlernen dies innerhalb kurzer Zeit. Der zentrale Aspekt dabei ist das Ausbalancieren des Gleichgewichts des MMSs bis zum Erreichen einer Mindestgeschwindigkeit, ab der das

einspurige Fahrzeug eine eigenständige Stabilität erlangt. Diese wird jedoch durch die träge Masse des Fahrradfahrenden beeinflusst, wodurch kontinuierliche Gegenmaßnahmen – Lenkbewegungen – ausgeführt werden müssen. (Doyle, 1987; Gressmann, 2002; Schwab & Meijaard, 2013)

Die primäre Fahraufgabe beim Fahrradfahren unterscheidet sich besonders auf der Stabilisierungsebene und auf Teilen der Bahnführungsebene vom Autofahren. Zur Fortbewegung des Fahrrades ist ein andauerndes Aufwenden von Energie in Form von Muskelkraft notwendig. Je nach Leistungsfähigkeit des Fahrenden führt die Belastung schnell zu einer physischen Ermüdung – Beanspruchung –, welche sich wiederum auf die Verkehrssicherheit auswirkt (Schnieder & Schnieder, 2013). Im Gegensatz zum Pkw hat beim Fahrrad das Körpergewicht des Fahrenden einen Einfluss auf die Fahrphysik. Zum Durchfahren einer Kurve kann der Schwerpunkt des Körpers nach links oder rechts außen verlagert werden, wodurch das Fahrrad in Schräglage gerät und eine Kurvenfahrt einleitet. Mit dem Gegensteuern bei der Kurvenausfahrt wirkt die Zentrifugalkraft und bringt das MMS aus Fahrrad und Fahrenden wieder in aufrechte Stellung. Dabei ist während dem Durchfahren des Manövers einer Kurve das MMS besonders anfällig für Richtungs- und Geschwindigkeitsänderungen. Die Trägheit der Masse des menschlichen Körpers wirkt sich auch belastend in anderen Fahrmanövern – Notbremsung – auf das MMS aus und beeinflusst damit die Fahrphysik. Zwar ist die das Auto steuernde Person ebenfalls eine träge Masse, jedoch ist diese durch den Sicherheitsgurt im Sitz arretiert und moderne Autositze verhindern das seitliche Wegrutschen zusätzlich, wodurch diesem Aspekt weniger Relevanz zukommt. (Doyle, 1987; Gressmann, 2002; Schwab & Meijaard, 2013)

Weiterführende Aspekte sind die unmittelbaren Belastungen der Umwelteinflüsse – Wetter, Lichtverhältnis, Untergrund, Wind etc. – auf die fahrradfahrenden Personen. Diese können nicht wie beim Pkw durch das Fahrzeug abgeschwächt werden – z. B. Schutz vor Regen. Diese erhöhten Belastungen benannte bereits schon Guth (2017) bei dem Vergleich der primären Fahraufgabe zwischen Pkw und Motorrad.

3.3 Ansätze zur Steigerung der urbanen Verkehrssicherheit

In der klassischen Fahrzeugtechnik sind Maßnahmen zur Verkehrssicherheit in aktive und passive Systeme gegliedert. Passive Maßnahmen verfolgen den Ansatz, die Folgen beim Eintritt eines Unfalls zu reduzieren – bspw. das Tragen eines Fahrradhelms. Hingegen wird bei den aktiven Maßnahmen das Ziel der Reduzierung der jeweiligen Eintrittswahrscheinlichkeit eines Unfalles angestrebt (Bubb, Bengler, Grünen et al., 2015). Eine im Zusammenhang mit den aktiven Maßnahmen weitverbreitete Theorie in der Verkehrssicherheit ist das Konstrukt der zeitlichen Sicherheitsmarge – engl. *safety margin*. Darunter ist zu verstehen, dass den Verkehrsteilnehmern ausreichend Zeit eingeräumt werden sollte, um in einer potenziell bevorstehenden Gefahrensituation angemessen reagieren zu können. Ermöglicht werden kann dies, in dem frühzeitig auf eine Gefahr hingewiesen wird oder präventiv die erlaubte Höchstgeschwindigkeit reduziert wird – bspw. verkehrsberuhigte Bereiche. Zum einen nähern sich dadurch die Geschwindigkeiten der unterschiedlichen Teilnehmenden im Verkehr an und zum anderen erhöht sich die theoretisch berechnete TTC zu einem möglichen Kollisionspunkt hin. In diesem Zusammenhang ist auch die Differenzierung von Informieren und Warnen nicht zu vernachlässigen. Dies wurde bereits in Unterkapitel 2.5.3 erläutert. Neben der Verfügbarkeit von Zeit zum Reagieren auf ein potenziell kritisches Event ist jedoch das rechtzeitige Erkennen und richtige Einschätzen der Situation bedeutend. Daher ist das gegenseitige sichtbar machen der relevanten Verkehrsteilnehmer untereinander essenziell (Bubb, Bengler, Grünen et al., 2015).

Welchen Einfluss intelligente Informationssysteme auf die Verkehrssicherheit von VRUs haben können, wurde von Silla et al. (2017) mittels der Ex-ante Bewertungsmethode von Kulmala (2010) auf Basis von Fachliteratur, Expertenbeurteilungen und der Unfalldatenbank der EU ermittelt. Silla et al. (2017) untersuchten die potenzielle Wirksamkeit von fünf unterschiedlichen Technologien – Blind Spot Detection, Bicycle to Vehicle Communication, Intersection Safety, VRU Detection + Emergency Braking und VRU Beacon System. Neben der Abschätzung der potenziellen Wirksamkeit wurde auch die Durchdringung der jeweiligen Technologien bei der Bewertung berücksichtigt. Die Autoren kommen

zu der Schlussfolgerung, dass in Zukunft alle Technologien einen positiven Einfluss auf die Verkehrssicherheit haben werden. Das Notbremssystem wird von ihnen am besten bewertet, wirkt jedoch nur auf einen bestimmten Unfalltyp. Hingegen kann die Technologie des vernetzten Verkehrs auf nahezu jede Art von Unfalltypen einen positiven Einfluss haben. Limitierend wirkt der aktuell noch sehr niedrige Durchdringungsgrad, wodurch die Technologie als solche schlechter abschneidet. Mit einer zunehmenden Verbreitung und Akzeptanz durch die Nutzenden besitzt diese Technologie das größte Potenzial zur Steigerung der Verkehrssicherheit. (Silla et al., 2017)

Im Rahmen des EU-Projekts XCYCLE (2016) sind eine Vielzahl von unterschiedlichen Ansätzen zur Verbesserung der Verkehrssicherheit analysiert und zusammenfassend dargestellt worden. Das Projekt fokussierte dabei als Ziel, die Benachteiligungen des Fahrradverkehrs zu reduzieren und dadurch die Sicherheitsmarge für diese zu erhöhen. Ergebnisse aus diesem Projekt sind unter anderem in den nachfolgenden Unterkapiteln dargestellt. Ein weiteres EU-Projekt BIKE PAL zielte auf eine umfassende Aufklärung hinsichtlich der Gefahren und möglicher Schutzmaßnahmen ab. Dabei wurde eine allgemeine Empfehlung zum sicheren Umgang mit einem Fahrrad erstellt. (European Transport Safety Council, 2012)

In den nachfolgenden Unterkapiteln sind die bestehenden aktiven Systemansätze sowie die jeweils damit verbundenen technologischen Wirkprinzipien übersichtlich zusammengefasst. Diesbezüglich sind die aktiven Systeme noch in autarke, vernetzte und infrastrukturelle Systeme differenziert. Sicherheitsmaßnahmen der autarken Kategorie zeichnen sich dadurch aus, dass diese als eigenständiges MMS funktionieren. Sie benötigen keine direkte Kommunikationsschnittstelle zu anderen Verkehrsteilnehmenden. Systeme, welche auf einen Datenaustausch zwischen den Teilnehmenden angewiesen sind, bilden die Gruppe der vernetzten Systeme. Intelligente Verkehrssicherheitsmaßnahmen, welche einer örtlichen limitierten infrastrukturellen Installation bedürfen und somit nur lokal wirken, sind der Kategorie infrastrukturelle Systeme zugeordnet. Davon unterschieden werden müssen jedoch bauliche Maßnahmen, wie beispielsweise geschützte Radstreifen (Stork et al., 2018). Diese werden im Rahmen dieser Aufgliederung nicht betrachtet und finden auch weiterführend keine Beachtung im Rahmen dieser Arbeit. Die Wirksamkeit solcher baulichen

Maßnahmen auf Fahrradfahrende sowie auf zu fußgehende Personen sind von Elvik (2009) und Erke (2018) eingehend analysiert worden. Im Unterkapitel 3.3.4 werden die Chancen, Limitationen und Herausforderungen dieser Ansätze erörtert. Einschränkend ist anzuzeigen, dass eine ganz eindeutige Differenzierung nicht immer möglich ist.

3.3.1 Integrierte autarke Systeme im Fahrzeug

Eigenständige im Fahrzeug fest verbaute Systemarten, die zur aktiven Verkehrssicherheit beitragen und keine Kommunikationsschnittstelle zu anderen Teilnehmenden im Verkehr brauchen, sind in diesem Unterkapitel aufgeführt.

Systeme im Kraftfahrzeug Assistenzsysteme, welche im Pkw und Lastkraftwagen (Lkw) verbaut werden, tragen zum Schutz von VRUs bei und sind bisher die am weitesten erforschten und entwickelten Systeme (Winner et al., 2015). Insbesondere bei Lkws zeigte sich, dass ein Totwinkel-Assistent (System zur Detektion und Warnung der Fahrenden von sich seitlich neben dem Fahrzeug befindlichen Objekten, im Speziellen beim rechts Abbiegen an Knotenpunkten) besonders wirkungsvoll bei der Vermeidung von Unfällen mit VRUs ist (Kühn & Hannawald, 2015). Im Pkw etablierte sich der Notbremsassistent als ein wirkungsvolles Instrument, welches durch radargestützte Detektion eine Gefahrenbremsung zur Unfallverhütung oder Reduzierung der Aufprallenergie ausführt (Bengler et al., 2018; Gasser et al., 2015). Weiterführend kann ein Nachtsichtassistent, bei dem mittels Infrarotkamera VRUs erkannt und für die fahrende Person auf einem Display kenntlich gemacht werden, zum Aufzeigen von Hindernissen verwendet werden (Khanh & Huhn, 2015; Knoll, 2015). Weitere Systeme und Forschungsansätze im Pkw sind aus Winner et al. (2015) und Bengler et al. (2018) zu entnehmen.

Antiblockiersystem (ABS) am Pedelec Beim Ausführen einer Gefahrenbremsung können die Räder vollständig blockiert werden, wodurch die Steuerbarkeit des Fahrrades stark eingeschränkt wird und somit die Stabilität des MMS nicht mehr gegeben ist. Das Blockieren der Räder führt zum Wegrutschen eines der beiden Räder oder zum abheben des Hinterrades mit anschließendem überschlagen des Fahrenden nach vorne. Diesbezüglich

konnte das im Pkw etablierte ABS auf ein Pedelec transferiert werden (Maier, 2018). Ferner sind mit diesem System Gefahrenbremsungen auch für Ungeübte möglich.

Externe HMIs am Fahrrad oder am Fahrenden Externe HMIs – Anzeigen für den umgebenen Verkehr – am Fahrrad oder getragen am Körper der fahrenden Person verfolgen das Ziel, Aufmerksamkeit zu generieren. Differenzierter betrachtet gibt es Systeme, welche eine kontinuierliche und allgemeine Aufmerksamkeit bei den anderen Teilnehmenden zur Kenntnisnahme der Existenz erzeugen wollen. Ebenso gibt es Systeme, welche auf geplante Fahrmanöver oder Verhaltensänderungen hinweisen wollen. Die Beleuchtung und damit auch das Anbringen von visuellen externen HMIs direkt am Fahrrad sind gemäß § 67 StVZO geregelt – weißes Licht nach vorne und rotes nach hinten. Zulässig sind darin nur dauerhaft leuchtende Anzeigen. Blinker oder Bremslichter wie beim Pkw sind am Fahrrad nicht zulässig. Direkt am Körper angebrachte zusätzliche Beleuchtungen unterliegen nicht dieser Verordnung. Eine Auswahl an Systemen ist der Tabelle 3.1 zu entnehmen.

Tabelle 3.1: Übersicht bestehender Anzeigesysteme zum Befestigen am Fahrrad oder zum Tragen am Körper (unabhängig von der Zulässigkeit).

Systeme*	Wirkprinzipien
<p><i>LightLane</i></p> 	<p>Sicherheitszone: Mittels auf die Straße projizierter Linien erzeugen die Fahrradfahrenden einen visuellen Sicherheitsbereich um sich herum.</p> <p>Quelle: https://www.altitudeinc.com/light-lane-product-innovation/ [Abgerufen am 18.03.2020]</p>
<p><i>Enfitnix CubeLite II</i></p> 	<p>Bremslicht: Ein in die Anstecklampe integrierter Beschleunigungssensor registriert negative Beschleunigungen und löst ein blinkendes Lichtsignal aus.</p> <p>Quelle: http://www.enfitnix.com/ProductDetail/3200774.html [Abgerufen am 18.03.2020]</p>
<p><i>Blinkers</i></p> 	<p>Blinker: Am Lenker und an der Sattelstütze angebrachte Lichtsignale zeigen den geplanten Richtungswechsel an. Durch ein zusätzlich am Lenker befestigtes manuelles Bediengerät kann die Richtung eingegeben werden.</p> <p>Quelle: https://www.blinkers.bike/ [Abgerufen am 18.03.2020]</p>
<p><i>WAYV</i></p> 	<p>Am Körper, Helm oder Rucksack befestigtes Anzeigesystem zur Erzeugung von Aufmerksamkeit bei anderen Verkehrsteilnehmenden und zur Signalisierung von geplanten Manövern. Gesteuert wird dies durch ein zusätzliches manuelles Bedienelement am Lenker.</p> <p>Quelle: https://wayv.uk/ [Abgerufen am 18.03.2020]</p>

*Die ausgewählten Systeme stehen exemplarisch für das dahinter stehende Wirkprinzip.

3.3.2 Vernetzte Systeme

Vernetzte Systeme zeichnen sich dadurch aus, dass die am Verkehr Teilnehmenden untereinander kommunizieren. Dies kann durch einen direkten Datenaustausch – Peer-to-Peer – oder über einen Vermittler – Backendsystem – geschehen. Beide Systemvarianten bieten verschiedene Vor- sowie Nachteile.

Peer-to-Peer Bei dieser Art von vernetztem System wird eine direkte Verbindung zum Datenaustausch zwischen den Akteuren (Peers) aufgebaut – meistens per WLAN oder Bluetooth (Fuchs et al., 2015). Da die Verbindungen lokal begrenzt sind, wird der Eindruck einer gewissen Sicherheit des Umgangs mit personenbezogenen Daten suggeriert. Jedoch sind diese Systeme nicht zwangsläufig sicherer als andere. Liebner et al. (2013) nutzen diese Variante zur Entwicklung eines Systems, welches die autofahrenden Personen vor einem in die gleiche Richtung fahrenden Fahrrad auf dem Fahrradweg warnt, falls die Autofahrenden ein Manöver zum rechts abbiegen planen. Dieses Vorhaben wurde prototypisch umgesetzt. Details zur genaueren Realisierung werden nicht angegeben. Der Schwerpunkt der Untersuchung lag auf der Qualität des GPS-Sensors der eingesetzten Smartphones. Die longitudinale Genauigkeit sowie die Übertragungslatenz sind ihrer Ansicht nach ausreichend genug für verkehrssicherheitsrelevante Fragestellungen. Lediglich die Qualität der lateralen Genauigkeit ist für eine Fahrbahnzuordnung nicht ausreichend genau. Im Rahmen eines Feldversuchs mit einem eigens entwickelten und damit hoch genauen Ortungssystem untersuchten Prati et al. (2018) die Akzeptanz der Fahrradfahrenden bezüglich einer Warnung – blinkenden LED am Lenker – im Falle einer potenziell bevorstehenden Kollision mit einem Pkw am nächsten Knotenpunkt. Dabei wurde diesem System von den Probanden eine gute Akzeptanz zugesprochen.

Backendbasierte Systeme Backendbasierte Systeme unterscheiden sich von der vorangegangenen Peer-to-Peer Systematik darin, dass zwischen den Teilnehmenden – Clients genannt – ein zentraler Server geschaltet wird. Die Clients stehen somit im kontinuierlichen Austausch mit einem Server. Das bietet den Vorteil einer umfangreicheren Rechenleistung sowie keines ständig neuen Verbindungsaufbaus mit anderen Teilnehmenden. Die Anzahl

an aufzubauenden Verbindungen kann gerade an viel befahrenen Knotenpunkten im urbanen Verkehr stark ansteigen und ist dadurch zu träge. Ein backendbasiertes System kann hingegen einen größeren Aktionsbereich um jeden einzelnen Teilnehmenden observieren und Maßnahmen für die einzelnen Clients planen und einleiten. (Fuchs et al., 2015)

Basierend auf diesem Kommunikationsprinzip untersuchten Jin et al. (2012) und Demmel (2015) die Möglichkeiten des Austausches von sicherheitsrelevanten Informationen. Sowohl die Genauigkeit der Positionsbestimmung als auch die Geschwindigkeit des Datentransfers stellten sich als Herausforderung dar, weshalb dieses Vorhaben nicht weiterverfolgt wurde. Volvo, POC und Ericsson präsentieren eine gemeinsame Konzeptstudie, bei dem der Fahrradfahrende auf ein Auto mittels LEDs im Helm hingewiesen wird (Volvo, 2014). Weiterführende Details dazu sind nicht bekannt.

3.3.3 Infrastrukturelle Systeme

Örtlich beschränkte und durch bauliche Maßnahmen installierte Systeme zur Steigerung der Verkehrssicherheit sind hier dargestellt.

Vernetzte Infrastruktur Eine digitalisierte und vernetzte Infrastruktur an Knotenpunkten kann dazu herangezogen werden, um zwischen den unterschiedlichen am Verkehr teilnehmenden Akteuren Daten zu vermitteln. Dieser Ansatz greift dazu auch Aspekte des Abschnitts 3.3.2 auf. Thielen et al. (2012) entwickelten für Kreuzungsbereiche eine Anwendung zur Warnung der Pkw-Fahrenden vor fahrradfahrenden Personen. Dabei stellt die jeweilige Infrastruktur – jede ausgestattete Lichtsignalanlage (LSA) – ein lokales WLAN zur Verfügung. Die sich annähernden Verkehrsteilnehmenden verbinden sich automatisch mit dem WLAN der LSA und tauschen ihre Positions- und Bewegungsdaten aus. Im Falle eines querenden Fahrradfahrenden bekommt der entsprechende Autofahrende eine Warnung durch die LSA auf sein Smartphone übermittelt.

Tote-Winkel Erkennung an Knotenpunkten Damit die Fahrradfahrenden, welche sich im toten Winkel von großräumigen Fahrzeugen (z. B. Lkws, Busse, Trams o. Ä.) befinden, beim Abbiegen nicht übersehen werden, gibt es mehrere Möglichkeiten: eine vorgezogene

Haltelinie an LSA, vorzeitige Grünphasen für Fahrradfahrende oder zusätzliche bedarfsgesteuerte leuchtende Hinweistafeln an LSA für die Kraftfahrzeuge. Die Erkennung von Fahrradfahrenden durch die Infrastruktur erfolgt dabei unter anderem per Wärmebildkamera, RFID-Chip, Bilderkennungsverfahren oder Induktionsschleifen im Boden. (Streeter, 2007, XCYCLE, 2016)

Hinweissignale an Knotenpunkten ohne LSA An Knotenpunkten ohne LSA können Hinweisschilder und Leuchtsignale (am Straßenrand oder in die Fahrbahn eingelassen) auf kreuzende Fahrradfahrende aufmerksam machen. Diese werden nur nach Bedarf angesteuert. Die Erkennung von Fahrradfahrenden kann unter anderem mittels Induktionsschleifen, Radar, Wärmebildkameras oder Infrarotlichtschranken erfolgen. (Kuhn, n. d.; TAPCO, 2019; XCYCLE, 2016)

3.3.4 Chancen, Limitationen und Herausforderungen der bestehenden Maßnahmen zur Steigerung der Verkehrssicherheit

Zur Verbesserung der Verkehrssicherheit besitzen moderne Pkws bereits sehr viele unterschiedliche Sensoren zur Detektion von Objekten im Straßenverkehr. Dennoch ist es auch für diese Sensoren nicht möglich, verdeckte Objekte zu erkennen (Liebner & Klanner, 2015). Gerade dieser Aspekt verringert die Wirksamkeit von Notbremsassistenten, welche ansonsten einen großen Beitrag zur Verkehrssicherheit leisten. Lösungsmöglichkeiten, welche genau diese Herausforderung adressieren, sind lokal installierte Hinweisleuchten oder -schilder. Diese Anzeigen werden durch die Annäherung der Fahrradfahrenden aktiviert. Nachteilig an diesen Maßnahmen ist, dass dazu bauliche Veränderungen notwendig sind, welche mit Errichtungs- und auch Instandhaltungskosten verbunden sind. Generell haben infrastrukturelle Lösungsansätze einen eingeschränkten Wirkradius, mit dem oftmals auch noch hohen Kosten verbunden sind. Damit sind solche Ansätze bei besonders gefährlichen Kreuzungspunkten eine adäquate Lösung, besitzen aber nicht das Potenzial, flächendeckend eingesetzt zu werden. Silla et al. (2017) konnte zeigen, dass die Vernetzung des Verkehrs die Möglichkeit bietet, nahezu alle Unfallszenarien abzudecken. Dies stellt

einen großen Vorteil gegenüber Insellösungen dar. Untersuchungen mit diesem Ansatz offenbaren Herausforderungen bei der technischen Realisierung sowie bei der Akzeptanz durch die Nutzenden. Gerade der zweite Aspekt variiert stark zwischen den bisherigen Studien (Demmel, 2015; Prati et al., 2018). In der Befragung von Demmel (2015) zeigte sich sogar, dass die Befragten Komfortanzeigen gegenüber sicherheitsrelevanten Informationen bevorzugen.

Hinsichtlich der identifizierten HMIs für Fahrradfahrende konnte eine gravierende Schwäche, welche unbedingt vermieden werden sollten, bei einem System ausgemacht werden. So ist bei Prati et al. (2018) eine LED am Lenker des Fahrrades befestigt und sendet ein Blicksignal an die fahrende Person, wenn es zu einer kritischen Situation kommt. Das Blinklicht stellt einen optischen Stimulus dar, mittels dessen die menschliche Aufmerksamkeit zur LED gelenkt wird (Vollrath, 2015). Damit wird der Blick bewusst aus dem Straßenverkehr gesteuert. Dieses Vorgehen ist zwar vergleichbar mit Anzeigen zur Warnung im Pkw, jedoch ist dort die Blickwinkeländerung deutlich geringer (vgl. Studie in Kapitel 5.5). Ferner ist die Fahraufgabe weniger komplex. Des Weiteren ist eben diese Art der Informationsübermittlung für den Pkw-Fahrenden tiefgreifender untersucht worden (vgl. Unterkapitel 2.4.2). Eine blinkende Lampe am Lenker eines Fahrrades kann somit die potenzielle Gefahr einer Situation noch verschärfen, anstatt diese zu entspannen. Aus diesen Gründen wird im Rahmen dieser Arbeit auf Warnhinweise im HMI für Fahrradfahrende vorerst verzichtet.

4 Anforderungen und Prämissen für das HMI-Konzept

Zur Steigerung der Verkehrssicherheit von VRU und dabei im Besonderen von Fahrradfahrenden soll im Rahmen dieser Arbeit ein HMI-Konzept, basierend auf der Vehicle-to-X (V2X) Kommunikationsstrategie entwickelt und evaluiert werden. Das Konzept soll sich dabei nicht auf ein spezifisches Verkehrsszenario beschränken, sondern weitgehend unabhängig von der Verkehrsinfrastruktur sein. Damit sollten mit diesem Konzept möglichst viele unterschiedliche potenzielle Unfallszenarien adressiert werden können (vgl. Zielsetzung in Unterkapitel 1.2). Die Unfallanalyse in Unterkapitel 2.3 zeigt, dass viele Fahrradunfälle bei einem kreuzenden Zusammentreffen mit einem Pkw im Straßenverkehr zustande kommen. Daher wird die Interaktion zwischen Fahrrad und Pkw in den Fokus der Untersuchung gestellt. Für die Entwicklung wird ein konkretes Anwendungsszenario (siehe Abbildung 4.1) definiert, damit die Prozessabläufe besser veranschaulicht werden können. Ferner ist das Konzept jedoch weitgehend unabhängig von dem Szenario oder der Verkehrsinfrastruktur anwendbar – kein Map Matching (Behrens et al., 2015). Die allgemeinen ergonomischen Anforderungen zur Gestaltung eines HMI aus Kapitel 2.5 werden in den jeweiligen Gestaltungsprozessen berücksichtigt. Bei der Entwicklung stehen die Usability, die Akzeptanz der Nutzenden sowie eine mögliche technische Realisierung im Fokus dieser Arbeit (siehe Abschnitt 2.5.2).

Die Universalität des Konzeptes wird dadurch gewährleistet, dass auf sehr restriktive Annahmen, welche gegebenenfalls einer Realisierung zum Status quo entgegenstehen könnten, verzichtet wird. Zur Veranschaulichung des Potenzials der Technologie sowie des darauf basierenden Systems werden diese auch unter Beachtung verschiedener Prämissen betrachtet. So ist die Prämisse, dass alle Verkehrsteilnehmenden miteinander vernetzt sind notwendig, so dass der volle Nutzen dieser Technologie zum Tragen kommt. Bereits die

Analyse von Silla et al. (2017) konnte aufzeigen, dass die Vehicle-to-X (V2X) Technologie ein sehr großes Potenzial besitzt (siehe Unterkapitel 3.3). Insbesondere wenn der Grad der Vernetzung immer weiter zunimmt. Wie bereits im Kapitel 2.2 gezeigt wurde, sind im aktuellen Straßenverkehr eine große Anzahl der Teilnehmenden bewusst oder unbewusst bereits vernetzt unterwegs. Daher ist die von Silla et al. (2017) zugrunde gelegte Annahme der Verbreitung sehr konservativ geschätzt und in der Realität wahrscheinlich heute schon deutlich höher. Genau lässt sich dies aber nicht sagen. Dahingehend ist ein genereller Verzicht auf Annahmen nicht unumgänglich und bietet somit die Möglichkeit, das Potenzial dieser Technologie aufzuzeigen.

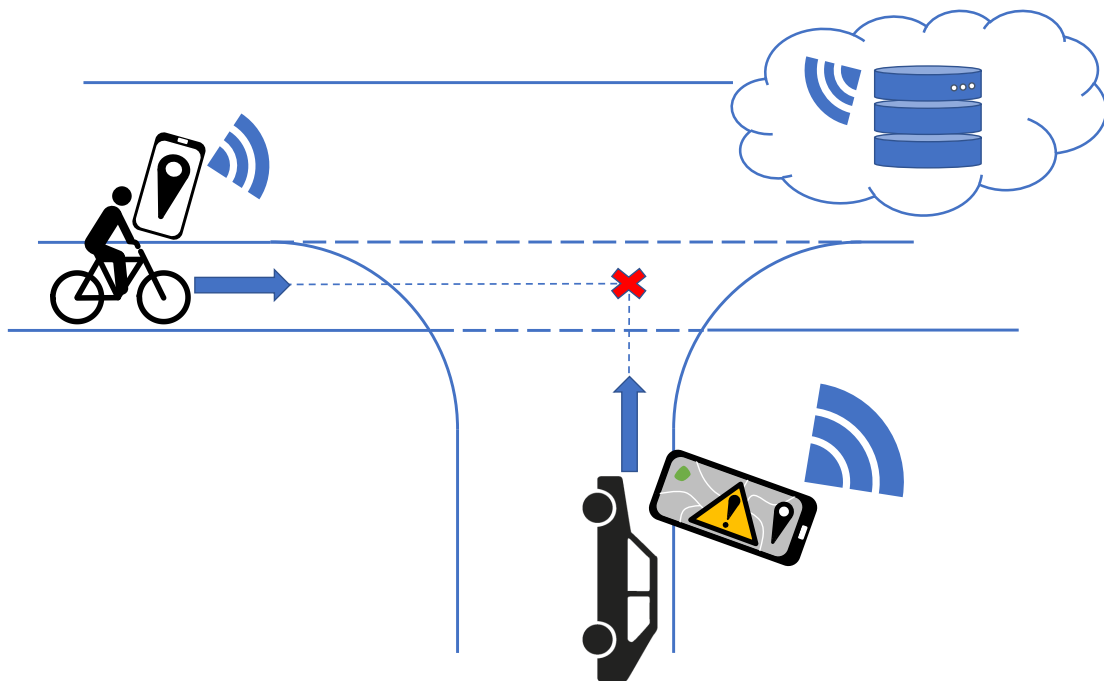


Abbildung 4.1: Untersuchungsszenario (T-Kreuzung mit Fahrradweg).

Die im nachfolgenden Kapitel beschriebene Entwicklung des HMI-Konzeptes setzt sich aus zwei unterschiedlichen Anzeigeinterfaces – autofahrende und fahrradfahrende Perspektive – zusammen. Beide Interfaces werden iterativ entwickelt und bilden in Kombination das HMI-Konzept. Die Entwicklung des Anzeigeconceptes für die Pkw-Perspektive ist im Abschnitt 5.2 beschrieben und die des Fahrrad-HMI im Abschnitt 5.4. Die autofahrenden Personen bekommen einen Hinweis über eine potenziell mögliche bevorstehende Kollision mit einem Fahrradfahrenden. Aus der Perspektive des Nutzenden auf dem Fahrrad

wird eine zur Routenführung konzipierte Anzeige entwickelt. Durch die Nutzung der Navigationsanzeige – vorwiegend Komfortbedürfnis und nicht sicherheitsrelevant – übermitteln die fahrradnutzenden Personen ihre Standortdaten an einen zentralen Server. Dieser gleicht die Daten mit denen der Autofahrenden ab und sendet im Falle einer möglichen bevorstehenden Kollision einen warnenden Hinweis an den entsprechenden Pkw. Auf eine Warnung oder einen Hinweis für die Fahrradfahrenden wird bewusst verzichtet, da eine ungünstige Anzeige von zeitkritischen Informationen zu einer Ablenkung führt und somit die Situation noch verschlechtert werden könnte (siehe Unterkapitel 2.5.3). Basierend auf den Ergebnissen der Studie im Unterkapitel 5.5 werden in der abschließenden Diskussion die Möglichkeiten der Anzeige von sicherheitsrelevanten Hinweisen für Fahrradfahrende diskutiert. Für die Gestaltung der Übermittlung von Informations- und Warnhinweisen an die Autofahrenden kann auf bestehende Forschungsergebnisse zurückgegriffen werden (vgl. Bengler et al., 2018; Götze, 2018).

5 Iterative Entwicklung und Evaluation des HMI-Konzeptes

Die in diesem Kapitel aufgeführten Studien untersuchen jeweils Teilaspekte des im Unterkapitel 1.2 definierten Zieles dieser Dissertation. Diesbezüglich weichen die Prämissen und Anforderungen, je nach Anwendungskontext (siehe Kapitel 4), in den nachfolgenden Studien voneinander ab. Im Unterkapitel 5.1 wird die Akzeptanz der Nutzenden hinsichtlich der V2X-Technologie untersucht. Darauf aufbauend wird im Abschnitt 5.2 der iterative Entwicklungsprozess des HMI für die Perspektive der Autofahrenden Personen mit dem Funktionsprinzip der Kollisionsverhütung beschrieben. Basierend auf der entwickelten Applikation wird eine tiefer greifende Untersuchung der Teilaspekte des Konstruktes der Akzeptanz für die potenziell Nutzenden – Auto- sowie Fahrradfahrende – durchgeführt (siehe Abschnitt 5.3). Für die Perspektive der fahrradfahrenden Personen wird die Entwicklung des gebrauchstauglichen Fahrrad-HMI im Unterkapitel 5.4 beschrieben. Hinsichtlich ihrer Straßenverkehrseignung wird anschließend im Abschnitt 5.5 das Fahrrad-HMI Konzept mit einem bestehenden System vergleichend evaluiert.

5.1 Untersuchung der Akzeptanz von vernetzten

Sicherheitsmaßnahmen der Verkehrsteilnehmenden

Wie in den vorangegangenen Kapiteln gezeigt wurde, können die Möglichkeiten zur Steigerung der Verkehrssicherheit von schwächeren Verkehrsteilnehmern sehr vielfältig sein. Silla et al. (2017) haben mittels der Ex-ante Bewertungsmethode aufzeigen können, dass die V2X-Technologie ein sehr großes Potenzial besitzt. Jedoch stellt die aktuell noch geringe Verbreitung solcher Systeme eine Herausforderung dar, wodurch das vorhandene Potenzial

nicht ausgeschöpft wird (Silla et al., 2017). Ausschlaggebend für den Erfolg eines solchen Systems wird nicht alleine das Erreichen einer flächendeckenden Verbreitung sein. Faktoren wie die Akzeptanz, die UX und nicht zuletzt die Vereinbarkeit mit der primären Fahraufgabe sind ebenfalls Aspekte, welche zu beachten sind.

Das Ziel der in diesem Unterkapitel beschriebenen explorativen Studie ist es, die Bereitschaft zur Nutzung eines Frühwarnsystems zur Kollisionsvermeidung zwischen Fahrrad und Pkw auf Basis der V2X-Technologie zu untersuchen. Diesbezüglich soll ein umfassendes Bild des Nutzungsverhaltens der Probanden hinsichtlich ihres Mobilitätsverhaltens, dem Umgang mit Smartphones, die Einstellung und das Verhalten bezüglich des eigenen Datenschutzes gemacht werden.

Diese Studie wurde im Rahmen eines interdisziplinären Projektes von Tondera, Hera und Eliseenkov (2018) durchgeführt und in Winzer et al. (2020) veröffentlicht. Um ein besseres Verständnis für die individuellen Einstellungen des Probandenkollektivs zum Mobilitätsverhalten und dem Umgang mit mobilen Kommunikationsmitteln zu erhalten, wurden die erhobenen Daten auch noch händisch qualitativ bewertet und weichen von der Auswertung von Tondera et al. (2018) und Winzer et al. (2020) etwas ab. Die detaillierten und tabellarischen Ergebnisse sind zudem im Anhang A.2 hinterlegt.

5.1.1 Forschungsfragen

Im Rahmen dieser explorativen Nutzerbefragung werden verschiedene Aspekte, welche im Zusammenhang mit dem Thema Verkehrssicherheit stehen, erhoben. Das angestrebte Ziel wird durch die im nachfolgenden aufgelisteten Forschungsfragen spezifiziert:

- F₁ Welche Ausprägungen weist das Mobilitätsverhalten des Probandenkollektivs im Vergleich zum bundesweiten Modal Split auf?
- F₂ Sind Fahrradfahrende bereit, ihren eigenen Standort mit anderen am Verkehr teilnehmenden Personen zu teilen, um ihre persönliche Verkehrssicherheit zu steigern?
- F₃ Kann mittels eines auf den Anwendungsfall modifizierten TAM-Fragebogens die Akzeptanz einer V2X-Applikation gemessen werden?
- F₄ Wird ein vernetzter Systemansatz zur Steigerung der Verkehrssicherheit von den Nutzenden akzeptiert?

5.1.2 Methodik

Zur Untersuchung der im vorangegangenen Unterkapitel genannten Forschungsfragen wurde ein Onlinefragebogen „Steigerung der Sicherheit von Fahrradfahrern im Straßenverkehr durch Car-2-X Kommunikation“ konzipiert (siehe Anhang A.1). Mittels der Software LimeSurvey wurden die Daten zwischen dem 13. Dezember 2017 und dem 15. Januar 2018 erhoben.

Die Studie ist in vier Abschnitte gegliedert, mit insgesamt 24 Fragen und einer 6-Item-Skala mit 7-Punkt-Antwortformat. Im ersten Abschnitt wird das Nutzungsverhalten als fahrradfahrende Person im Straßenverkehr abgefragt. Der zweite Teil befasst sich mit den allgemeinen Nutzungsgewohnheiten eines Smartphones sowie fortführend die Verwendung des Smartphones während des Fahrradfahrens. Zu Beginn des dritten Abschnitts wird anhand eines speziellen Szenarios (siehe Abbildung 4.1) den Teilnehmenden das hier verfolgte Funktionsprinzip der Kollisionsverhütung erläutert. Mit sechs speziell definierten Items (siehe Tabelle 5.1) soll versucht werden, die Akzeptanz der Nutzenden zu messen. Diese sechs Items orientieren sich dabei an den zwei von Davis (1993) im TAM definierten

Dimensionen, der wahrgenommenen Benutzerzufriedenheit sowie der Nützlichkeit (siehe Abbildung 2.2). Die zu evaluierende Technologie basiert, abweichend zu der von Davis (1993) untersuchten Technologie, zusätzlich noch auf der Verwendung von personenbezogenen Standortdaten. Diesbezüglich sind ergänzende Items entwickelt worden, welche die individuelle Einstellung zum Datenschutz abbilden sollen. Basierend auf diesen Items wird eine Item- und Faktorenanalyse durchgeführt, mit dem Ziel des Ableitens eines Indexes zur Erfassung der Akzeptanz. Zwei qualitative Kontrollfragen sind dem Item-Fragebogen nachgelagert. Diese dienen der Überprüfung der konstruierten Items und prüfen zudem ob die Probanden das abgebildete Funktionsprinzip (siehe Abbildung 4.1) hinreichend verstanden haben. Im letzten Abschnitt werden die demographischen Daten der Probanden erhoben.

Tabelle 5.1: Items zur Messung der Nutzerakzeptanz (nach Tondera et al., 2018).

#	Items	Skala
1	Ich habe Bedenken gegenüber einer App, die meine Standortdaten mit anderen Verkehrsteilnehmern teilt.	1...7
2	Ich würde die hier geplante App selber benutzen.	1...7
3	Wenn ich dadurch Prämien einsparen kann, habe ich nichts dagegen, wenn mein Versicherer Daten über meine Radnutzung erhält.	1...7
4	Ich würde es begrüßen, wenn Verkehrsteilnehmer künftig gesetzlich verpflichtet sind, an der Car-to-X Kommunikation mit Kollisionsalarm teilzunehmen.	1...7
5	Eine App zum Fahrradfahren zu benutzen, wäre für mich zu viel Aufwand.	1...7
6	Ich glaube an einen tatsächlichen Nutzen für die Sicherheit durch diese Idee.	1...7

5.1.3 Ergebnisse

In diesem Kapitel sind nachfolgend die zentralen Ergebnisse der Probandenbefragung dargestellt. Ergebnisse, welche für diese Arbeit weniger an Relevanz besitzen, sind in gekürzter Form abgebildet oder teilweise ausgespart. Ergänzend sind alle Ergebnisse noch in ausführlicher und tabellarischer Form zur Übersichtlichkeit im Anhang A.2 hinterlegt. Alle

von Tondera et al. (2018) erhobenen Daten sind erneut qualitativ und quantitativ ausgewertet worden. Die Auswertung wurde mit der Software IBM SPSS 25 und teilweise händisch vorgenommen. Ferner sind dem Bericht zum interdisziplinären Projekt von Tondera et al. (2018) die vollständigen Fragen sowie Antworten zu entnehmen.

5.1.3.1 Probandenkollektiv

An der Studie haben insgesamt 184 Personen teilgenommen, wovon 154 die Umfrage vollständig ausgefüllt haben. Ein Proband musste aufgrund offensichtlicher Falschaussage von der Studie ausgeschlossen werden. Somit setzt sich das Probandenkollektiv aus N = 153 Personen (90 männliche, 60 weibliche und 3 ohne Auskunft) im Alter von 17 bis 83 Jahren (M = 30,01; SD = 10,72) zusammen.

5.1.3.2 Mobilitätsverhalten

Überwiegend erreichen die Befragten ihren Arbeitsplatz mit den öffentlichen Verkehrsmitteln (rund 41 %). Etwa 31 % nutzen für den Weg zur Arbeit hauptsächlich einen Pkw und nahezu 21 % kommen mit dem Fahrrad. Keiner der Probanden fährt vorwiegend mit dem Motorrad zur Arbeitsstelle. Dafür bewältigen etwa 6 % den Weg zu Fuß. Die beiden als hauptsächlichsten Nutzungsgrund angeführten Aspekte zur Verwendung eines Fahrrades dienen der Freizeitgestaltung (30 %) oder dem Weg zum Arbeitsplatz (26 %). Rund 88 % der Befragten geben an, dass sie im Besitz eines Fahrrades sind. Bei der Intensität der Nutzung des Fahrrades in den Sommermonaten berichten knapp 53 % der Befragten, dass sie dieses oft bis sehr oft nutzen. Lediglich gute 9 % geben an, nie ein Fahrrad zu nutzen. Dabei sind nur etwa 8 % Kunden bei einem Fahrradverleiher – Bike Sharing. Lediglich 5 % haben eine Smartphonehalterung am Fahrrad und 8 % nutzen einen Fahrradcomputer. Von den Befragten geben zudem 6 % an, dass sie innerhalb der letzten fünf Jahren als fahrradfahrende Person einen Verkehrsunfall mit einem Pkw hatten.

5.1.3.3 Nutzungsverhalten von Smartphones

Von den 153 Befragten geben 98 % (n = 150) an, ein Smartphone zu besitzen. Drei Personen des Probandenkollektivs haben kein Smartphone. Eine Person von diesen berichtet,

dass sie ein klassisches Handy besitzt. Somit sind lediglich zwei Personen des Probandenkollektivs nicht mit einem mobilen Endgerät ausgestattet. Vorwiegend wird das mobile Endgerät für private Angelegenheiten (84 %) genutzt. Die Kategorien der am häufigsten verwendeten Applikationen spiegeln dies auch wider (vgl. Anhang A.2 Frage B9). Als häufigste Anwendung – mit einem Drittel – werden Textnachrichtendienste (33 %) genannt, gefolgt von sozialen Netzwerken (14 %). Dabei macht die Verwendung von Navigations- und Kartenapplikationen rund 6 % aus. Etwas mehr als die Hälfte (54 %) geben an, dass sie ihr Smartphone nicht während des Fahrradfahrens bedienen. Jedoch hören gut 22 % Musik, 14 % nutzen eine Navigationsfunktion, fast 5 % schreiben Textnachrichten und gute 3 % telefonieren (siehe dazu Anhang A.2 Frage B6). Zum Umgang mit der Verwendung von Standortdaten für bestimmte Applikationen haben rund 21 % angegeben, diese immer aktiviert zu haben und etwa 59 % erlauben den Zugriff bei Verwendung. Womit in Summe nahezu 80 % der Befragten im Allgemeinen mit der Nutzung von Ortungsdiensten einverstanden sind und diese auch bewusst zulassen. Lediglich 13 % geben an, ihren Ortungsdienst nie zu verwenden (vgl. A.2 Frage B6).

5.1.3.4 Akzeptanz von V2X-Systemen

Das Ergebnis der Item- und Faktorenanalyse ist in Tabelle 5.2 zusammengefasst. Dabei ergibt sich ein Cronbach's α von 0,804 über alle Items. In Anlehnung an Field (2009, S. 677) handelt es sich somit um einen guten und reliablen Wert. Ein Ausschluss des Items 3 würde nur eine marginale Verbesserung bezwecken. Der jeweilige Schwierigkeitsindex P der Items befindet sich nach Moosbrugger & Kelava (2008, S. 85) außerhalb der beiden Extrembereiche (<20: zu leicht; >80: zu schwer) und ist damit im akzeptablen Sektor. Ferner liegt die Trennschärfe aller Items, ausgenommen von Item 2, im guten Bereich zwischen 0,4 und 0,7 (Moosbrugger & Kelava, 2008, S. 84). Die höchste Zustimmung unter den Items erlangt das Item 6 (M = 4,21), der Glaube an den Nutzen für die Sicherheit durch dieses Verfahren.

Eine Hauptkomponentenanalyse wurde durchgeführt, um die wichtigsten und unabhängigen Faktoren zu extrahieren. Das Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) Kriterium liegt mit $KMO = ,763$ im guten Bereich, womit die Eignung des Datensatzes für eine Faktorenanalyse

Tabelle 5.2: Ergebnisse der Itemanalyse (N = 153) (nach Winzer et al., 2020).

Item	Fehlen	Mittelwert	Standardabweichung	Schiefe	Schwierigkeitsindex P	Trennschärfe	α , wenn Item weggelassen
1	0	3,10	1,822	0,611	35,00	0,565	0,773
2	0	3,40	1,829	0,177	40,00	0,792	0,718
3	0	2,70	1,803	0,732	28,33	0,416	0,806
4	0	2,86	1,766	0,502	31,00	0,547	0,777
5	0	3,48	1,916	0,298	41,33	0,517	0,785
6	0	4,21	1,768	-0,388	53,50	0,549	0,777
		3,29	1,293			Cronbach's $\alpha = 0,804$	

gegeben ist (Hutcheson & Sofroniou, 1999, zit. nach Field, 2009, S. 647). Der Bartlett-Test auf Sphärizität $\chi^2(15) = 304,015$; $p < ,001$ ist hochsignifikant, wodurch eine ausreichend hohe Korrelation zwischen den Items gegeben ist, um eine Hauptkomponentenanalyse durchzuführen. In Betracht gezogen wurden nur Faktoren mit einem Eigenwert von größer gleich eins (Kaiser, 1960). Nach dem Kaiser Kriterium sowie aus dem Scree-Plot kann ein Faktor extrahiert werden, welcher 51,326 % der Varianz erklärt (siehe Abbildung 5.1).

5.1.3.5 Qualitative Datenauswertung

Insgesamt haben 108 Probanden die qualitative Frage nach ihrer persönlichen Einstellung zur Kollisionsverhütung nach dem hier dargestellten Verfahren beantwortet. Aus den Antworten konnten 166 Kriterien identifiziert werden, welche in acht Kategorien zusammengefasst wurden (siehe Tabelle 5.3). Sieben Kategorien bündeln dabei unterschiedliche inhaltliche Äußerungen. In der Achten werden die Aussagen zusammengefasst, aus welchen ersichtlich ist, dass die Befragten den Prozessablauf der Anwendung nicht verstanden haben. Beispielsweise wurde von diesen angeführt, dass eine grafische Anzeige für die fahradfahrende Person eine zu große Ablenkung darstellt. Im Rahmen der Instruktion ist jedoch eindeutig darauf hingewiesen worden, dass es kein Anzeigekonzept (HMI) für die Rolle des Fahrradfahrenden gibt. Unter Ausschluss dieser Probanden ergibt sich daher die in der ganz rechten Spalte von Tabelle 5.3 hinterlegte Häufigkeitsverteilung. Den aufbereiteten Daten der Tabelle 5.3 (ohne die Missverstehenden in der rechten Spalte) ist zu entnehmen,

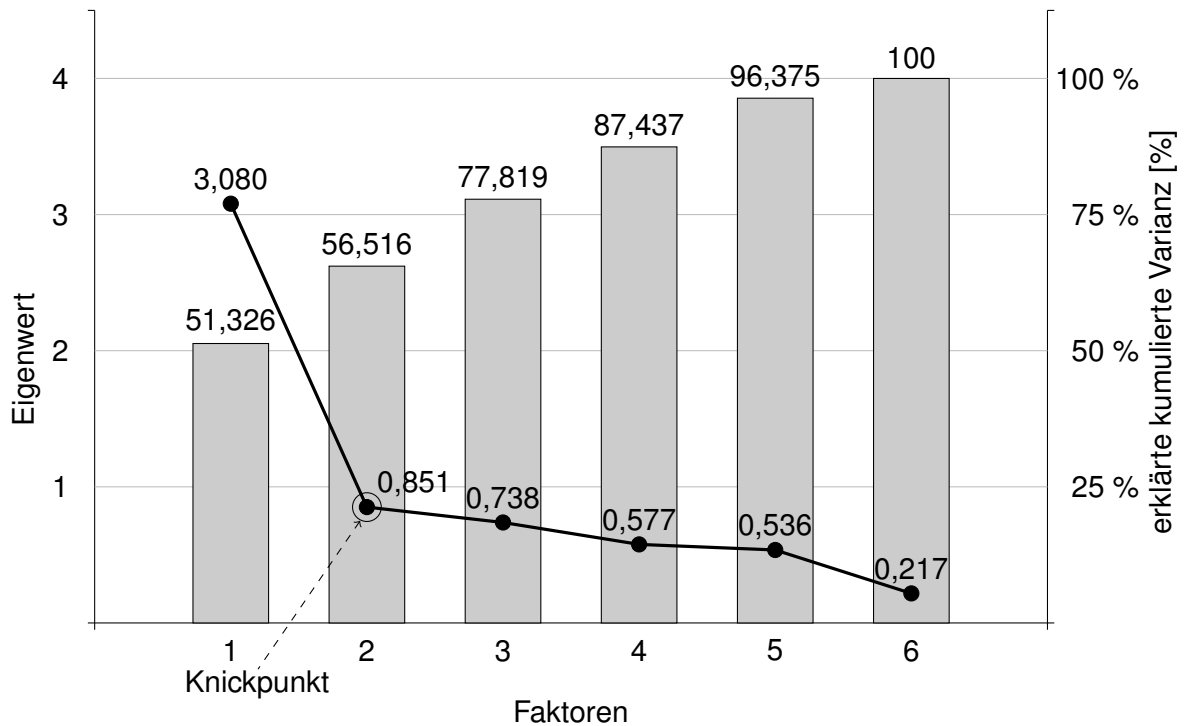


Abbildung 5.1: Der Screeplot zur Hauptkomponentenanalyse und die erklärte kumulierte Varianz der Faktoren.

dass fast 30 % der Probanden die Ideen hinter der Applikation für gut befinden und darin eine Steigerung der Sicherheit für die fahradfahrenden Personen sehen. Die zusätzlich auf die Autofahrenden einwirkende Belastung nehmen etwa 18 % als kritisch wahr. Ebenfalls werden Bedenken bezüglich des Datenschutzes, der technischen Realisierung sowie Verbreitung geäußert.

5.1.4 Zusammenfassung und Diskussion

Im Rahmen der Studie wurde ein Fragebogen konzipiert, welcher ein allgemeines Abbild des Nutzungsverhaltens der Probanden wiedergeben soll und weiterführend den Anspruch hat, die Akzeptanz hinsichtlich der Nutzung von V2X-Systeme zu messen. Die Ausstattung des Probandenkollektivs mit einem mobilen Endgerät (98 %) entspricht dem bundesdeutschen Durchschnitt von 97 %. Die Zugänglichkeit zu einem Fahrrad mit 88 % ist etwas höher als bei den Angaben von 79 % des Statistischen Bundesamtes (2019b). Die Häufigkeit des Fahrrades, des ÖPNVs und der zu Fuß Gehenden ist höher zu ungunsten der Pkw Nutzenden. Ursache dafür könnte sein, dass die Daten des Modal Splits aus dem Jahr

Tabelle 5.3: Ergebnisse der qualitativen Datenauswertung bezüglich der grundlegenden Einstellung hinsichtlich eines smartphonebasierten Ansatzes zur Unfallverhütung (N = 108; mehrfach Nennungen möglich).

Kategorien	Anzahl	rel. Häufigkeit	rel. Häufigkeit (ohne Missverstehen)
Erhöht die Sicherheit / gute Idee	46	27,71 %	29,30 %
Ablenkung der Autofahrenden	28	16,87 %	17,83 %
Bedenken hinsichtlich des Datenschutzes	28	16,87 %	17,83 %
Nutzungsaufwand ist unverhältnismäßig/ Distribution zu limitiert	21	12,65 %	13,38 %
Bedenken zur technischen Umsetzbarkeit	20	12,05 %	12,74 %
Energieverbrauch am Smartphone zu hoch	14	8,43 %	8,92 %
Generelles Missverstehen der Anwendung	9	5,42 %	-

2017 stammen und sich in den letzten Jahren der Verkehrswandel weiter fortgesetzt hat. Diese These unterstützt auch die Absatzsteigerung der Fahrradbranche in den letzten beiden Jahren (Eisenberger, 2019, 2020). Abgesehen vom Fahrrad (hier: 21 % statt 12 % in Kuhnimhof et al. (2019)) ist das Mobilitätsverhalten des Probandenkollektivs mit dem bundesdeutschen Durchschnitt von der groben Struktur der Verteilung vergleichbar (Modal Split in Abbildung 3.1).

Zur Messung der Akzeptanz wurde ein Fragebogen, basierend auf dem Modell von Davis (1993) konstruiert. Sowohl die Faktoren- als auch die Hauptkomponentenanalyse unterstützen dies. Damit kann davon ausgegangen werden, dass der Fragebogen in Teilen die Akzeptanz widerspiegelt. Mit absoluter Sicherheit ist dies jedoch nicht zu sagen, da dafür weitere Untersuchungen notwendig wären. Basierend darauf, dass der Fragebogen die Akzeptanz misst, so fällt diese im Allgemeinen mit $M = 3,29$ ($SD = 1,29$) – auf der Skala von 1 bis 7 – leicht unterdurchschnittlich aus. Mit Bezugnahme auf die qualitativen Aussagen ist deutlich zu erkennen, dass rund 30 % der Befragten die Steigerung der Verkehrssicherheit mittels dieser Technologie befürworten, jedoch werden auch einige Bedenken geäußert. So wird beispielsweise der Umgang mit den personenbezogenen Daten oder die zusätzliche Belastung für die Autofahrenden kritisch hinterfragt. Eben diese Bedenken erklären, warum ein solches System keine besonders hohe Akzeptanz erfährt.

Unter Einbeziehung der weiteren Auskünfte zu den allgemeinen Nutzungsgewohnheiten ergibt sich ein etwas differenzierteres Bild. Bei dem Umgang der Smartphoneeinstellung mit den personenbezogenen Standortdaten geben etwa 80 % an, diese zu verwenden. Gerade der Umgang mit personenbezogenen Daten stellte zuvor noch für viele Befragte ein Ausschlusskriterium dar. Somit ergibt sich hinsichtlich der Akzeptanz für das hier aufgeführte V2X-System eine gewisse Diskrepanz. Die Auskünfte zur Akzeptanz decken sich nicht mit dem tatsächlich gelebten Verhalten der Befragten. Dieses Ergebnis bestärkt die bereits von Sokoll & Herrmann (2020) aufgezeigte Divergenz zum Thema Datenschutz (siehe Unterkapitel 2.2).

Das angegebene Verhalten der Probanden bezüglich des Ausführens von Nebentätigkeiten beim Fahrradfahren ist mit rund 45 %¹¹ sehr hoch. Diese Tätigkeiten werden die Befragten vermutlich nicht dauerhaft beim Fahrradfahren ausüben, wodurch eine deutlich höhere Anzahl, im Vergleich zu den Momentaufnahmen aus den Verkehrsbeobachtungen (vgl. de Waard et al., 2015; Huemer et al., 2019; Terzano, 2013; Wolfe et al., 2016 in Abschnitt 2.4.2) plausibel erscheinen lässt. Bei dem Vergleich der speziellen Nebentätigkeiten Texten (5 %) und Telefonieren (3 %) sind die Angaben jedoch ähnlich mit den aus denen Verkehrsbeobachtungen (vgl. Unterkapitel 2.4.2). Gerade diese Auskünfte zum Umgang mit Nebentätigkeiten können als relativ zuverlässig angesehen werden, da durch die Erhebungsform ausreichend Anonymität besteht, dass keine sozial erwünschten Antworten von den Befragten gegeben werden (Esser, 1991).

Nicht zu unterschätzen ist jedoch, dass neun der Befragten offensichtlich nicht genau das Funktionsprinzip der Anwendung verstanden haben. Werden eben diese Personen von der Befragung ausgeschlossen, so steigt die durchschnittliche Akzeptanz ($M = 3,32$; $SD = 1,31$) leicht an (siehe vollständige Auswertung im Anhang A.1). Zwar verbessert sich die Akzeptanz nur unwesentlich, jedoch haben nur 108 von den 154 Befragten eine qualitative Antwort gegeben. Daher könnte es auch möglich sein, dass die Instruktion nicht eindeutig genug war und somit die Ergebnisse negativ beeinflusst wurden.

Fortführend ist daher das hier gewählte Konstrukt der Akzeptanz tiefer gehend zu betrachten und um andere Facetten zu erweitern. Da die Ergebnisse auch offerieren,

¹¹ Summe aus allen Nebentätigkeiten (vgl. Anhang A.2 Frage B6).

dass nicht jede teilnehmende Person die Systematik vollständig verstanden hat, kann eine intensivere Auseinandersetzung durch die potenziellen Nutzenden mit dem System die Akzeptanz positiv beeinflussen (Regan et al., 2014). Diesbezüglich wird im anschließenden Unterkapitel die Entwicklung einer Smartphone-Applikation beschrieben, anhand derer im darauffolgenden Unterkapitel 5.3 weitere Aspekte der Akzeptanz untersucht werden können.

5.2 Iterative Entwicklung der Applikation zur Kollisionsverhütung

In diesem Unterkapitel wird der iterative Entwicklungsprozess des HMI zur Kollisionsverhütung von einem Design- und High-Fidelity-Prototypen (siehe Abschnitt 5.2.1) mit dessen Funktionsprüfung im Feld bis hin zu einer voll funktionsfähigen Android-Applikation (siehe Abschnitt 5.2.2) beschrieben. Im vorangegangenen Unterkapitel ist die Akzeptanz der Nutzenden hinsichtlich eines Systems, basierend auf der V2X-Technologie untersucht worden. Es zeigte sich, dass die Auskünfte der Nutzenden teils widersprüchlich sind und keinen eindeutigen Rückschluss zulassen. Für die Entwicklung eines solchen Systems ergeben sich neben der Akzeptanz noch weitere technische Herausforderungen – Latenzzeit beim Datenaustausch mit dem Server und die GPS-Qualität. Die notwendige Echtzeitkommunikation zwischen den Endgeräten und dem Server wird beeinflusst durch die Latenzzeit – Zeitbedarf für den Informationsaustausch hin und wieder zurück von einem Endgerät zum Server. Die Latenzzeit wird durch die Qualität und Auslastung des Mobilfunknetzes sowie die Leistungskapazität des Servers maßgebend beeinflusst. Des Weiteren wird die Positionsbestimmung mittels des integrierten GPS-Sensors im Smartphone durch dessen maximale Abtastrate von 1 Hz und der fehlerbehafteten Genauigkeit begrenzt. Mangels einer ausreichenden technischen Verfügbarkeit sind bereits vorangegangene Bestrebungen eingestellt worden (vgl. Jin et al., 2012; Demmel, 2015¹²; Liebner & Klanner, 2015; Prati et al., 2018). Die in diesen Studien angeführten Hürden waren die Übertragungsgeschwindigkeit des Mobilfunknetzes sowie die Genauigkeit der Ortung. Diese Aspekte werden ebenfalls im Rahmen eines Proof-of-Concept im Feldversuch untersucht.

Weitere Ergebnisse und die einzelnen Schritte der Programmierung zur Applikation sowie des Backendservers können Tondera et al. (2018), Winzer et al. (2020) und Eliseenkov (2019) entnommen werden.

¹² Auf Rückfrage wurde mitgeteilt, dass das Vorhaben nicht weiter verfolgt wird (Stand: 25.03.2020).

5.2.1 Entwicklung und Erprobung eines Prototypen zur Kollisionsverhütung

Die nachfolgend aufgeführten Unterpunkte erläutern die zentralen Aspekte, welche zum Verständnis der Funktionsweise und der Entwicklung zu einem funktionstüchtigen Android-Prototypen notwendig sind.

5.2.1.1 Technische Umsetzung

Die Realisierung der Kollisionsverhütungs-Applikation basiert auf dem Ansatz der V2X-Kommunikation, mit einem Server als Backendsystem und den Smartphones der Nutzenden als Clients (vgl. Unterkapitel 3.3.2). Besonders vorteilhaft an diesem Verfahren ist, dass eine weitgehend flächendeckende Kommunikation über das Mobilfunknetz sichergestellt ist und diese mit zunehmendem qualitativen und quantitativen Ausbau weiter ansteigt. Die Funktionsweise sieht dabei vor, dass die Informationen der einzelnen Clients auf dem Backendserver zusammenlaufen und dort zentral verarbeitet werden. Die aus dem Abgleich der Standortdaten resultierenden Ergebnisse über mögliche Schnittpunkte in der realen Welt werden dann an die Clients zurückgesendet. Dies entspricht dem im Schaubild 4.1 dargestellten Szenario. Dieses Prinzip der Datenübertragung wird bereits erfolgreich bei einigen Fahrerassistenzsystemen im Pkw-Segment angewendet (Klanner & Ruhhammer, 2015). Es müssen demzufolge keine lokalen Verbindungen zwischen den Verkehrsteilnehmern aufgebaut werden. Weiterführend bietet dieser Ansatz die Möglichkeit einer zukünftigen Integration des Systems in andere kartenbasierte Anwendungen (bspw. Google Maps oder den Bordcomputern von Pkws).

5.2.1.2 Hinweiskriterien

Im Unterkapitel 2.5.3 ist bereits das Dilemma beim Warnen oder Hinweisen für eine mögliche kritische Situation erläutert worden. Zur Reduzierung der Anzahl von fehlerhaften Meldungen werden Kriterien definiert, welche dem entgegenwirken sollen. Damit ein Warnhinweis über eine potenzielle Gefahrensituation an den Autofahrer gegeben wird (wie in Abbildung 5.4), sind die im Folgenden aufgeführten Kriterien zu erfüllen.

Verringert sich die direkte Entfernung (d_{AF}) zwischen einem Auto und einem Fahrrad auf kleiner gleich 200 m, dann werden die jeweiligen Trajektorien auf Basis der letzten Koordinaten in Form von Geraden prognostiziert. Dazu wird die Methode der kleinsten Quadrate unter zusätzlicher Beachtung der zeitlichen Komponente der Punkte verwendet, um eine Ausgleichsgerade zu berechnen. Voraussetzung für das weitere Vorgehen ist, dass sich die berechneten Geraden der beiden am Verkehr teilnehmenden Beteiligten kreuzen. Trifft dies zu, so wird die jeweilige Bewegungsrichtung zum ermittelten Schnittpunkt betrachtet. Beide Verkehrsbeteiligte müssen sich darauf zubewegen, da ansonsten einer der beiden bereits den Schnittpunkt passiert hat. Im Szenario einer Folgefahrt könnten die Kriterien des Abstandes und der Bewegungsrichtung zum Schnittpunkt ebenfalls erfüllt werden, jedoch ergibt sich dadurch keine Kreuzungssituation, sondern ein Überholen oder Passieren. Die Herausforderungen, welche sich bei einem Überholenszenario oder einer Fahrt in die gleiche Richtung ergeben, sind in Liebner et al. (2013) nachzulesen. Aus Sicht der Verkehrssicherheit ist dieses Szenario auch nicht eines der kritischsten Szenarien und wird damit zu diesem Entwicklungszeitpunkt hier nicht adressiert (Hummel & Lang, 2016). Zur Sicherstellung, dass es in einem solchen Szenario nicht zu einer unberechtigten Warnung kommt, wird das Kriterium des Kreuzungswinkels eingeführt. Für den Winkel zwischen den berechneten Trajektorien wird die Annahme getroffen, dass dieser größer als 20° sein muss. Abschließend ist sicher zu stellen, dass die beiden Verkehrsbeteiligten nahezu gleichzeitig am berechneten Schnittpunkt eintreffen. Durch den Vergleich der jeweiligen TTC kann dies gewährleistet werden. Die sich aus der Subtraktion der TTC des Fahrrades und Autos ergebene Differenz sollte im Betrag kleiner als eine Sekunde sein. Durch dieses sehr kleine Zeitfenster soll die Möglichkeit von Fehlinweisen reduziert werden. Liebner et al. (2013) wählten einen deutlich größeren Zeitraum von -3 bis +2 Sekunden, wohingegen sich Thielen et al. (2012) für einen Sicherheitsbereich um den berechneten Schnittpunkt entschieden. Basierend auf Testfahrten während der Entwicklung hat sich das kleine Zeitintervall bewährt.

Zusammenfassend lassen sich damit die folgenden fünf Kriterien definieren, welche für einen warnenden Hinweis erfüllt sein müssen und die in Abbildung 5.2 grafisch veranschaulicht sind:

1. Abstand der Verkehrsbeteiligten zueinander $d_{AF} \leq 200$ m
2. Schnittpunkt der beiden Trajektorien
3. Bewegungsrichtung der Teilnehmenden zum Schnittpunkt hin
4. Winkel zwischen den Trajektorien $> 20^\circ$
5. Zeitliche Differenz der Ankunftszeit am Schnittpunkt: $|\Delta TTC| < 1$ s

Die jeweilige Geschwindigkeit der beiden Verkehrsteilnehmenden ist sehr dynamisch und kann sich daher schnell ändern. Damit können die aufgeführten Kriterien frühestens bei einem direkten Abstand von 200 m erfüllt sein oder jedoch erst unmittelbar vor dem Aufeinandertreffen. Bezogen auf die Differenzierung zwischen Warnen und Hinweisen (siehe Unterkapitel 2.5.3) kann dieses System somit Hinweise – sehr frühes Ausführen – aber auch sehr zeitkritische Warnungen aussprechen. Zwischen diesen beiden Zuständen wird aktuell noch nicht weiter differenziert.

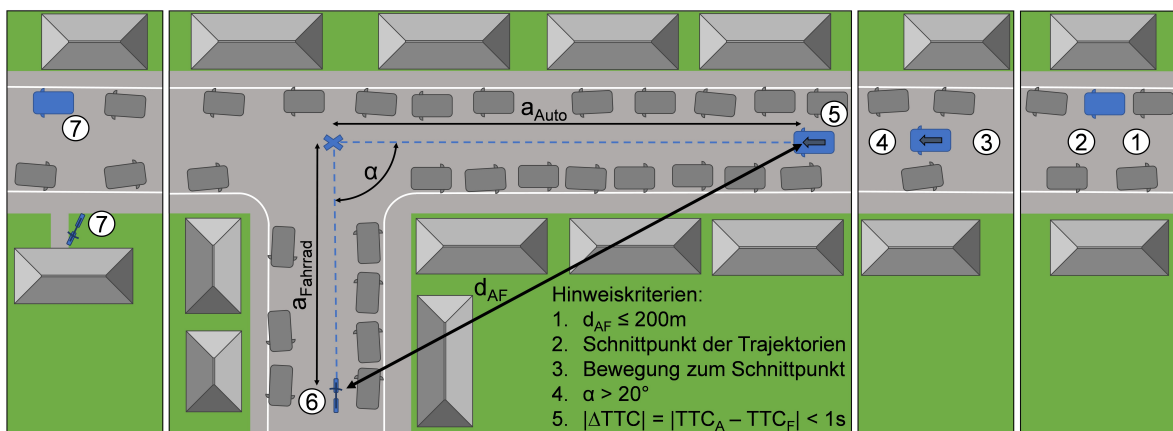


Abbildung 5.2: Schematische Darstellung eines beispielhaften Szenarios mit Bezug auf die jeweiligen Zustände des HMI (siehe Tabelle 5.5) sowie den Bedingungen für einen warnenden Hinweis; den geografischen Beschaffenheiten des Feldtests (Abbildung 5.4) nachempfunden.

5.2.1.3 Datenschutz

Zum Schutz der personenbezogenen Daten sind keine registrierungspflichtigen Accounts vorgesehen. Die Nutzenden generieren durch das Starten der Applikation und damit für jede

Fahrt eine neue Identifikationsnummer (ID). Die jeweilige ID ist einem Verkehrsteilnehmenden so lange zugeordnet, bis dieser die Fahrt per Knopfdruck beendet oder die App schließt. Bei erneutem Fahrtantritt wird eine neue ID vergeben. Dadurch ist ein zurückverfolgen oder das Anlegen von Verhaltensprofilen nur mit unverhältnismäßig großem Aufwand möglich (siehe Tabelle 5.5 Abbildung ⑥).

5.2.1.4 HMI-Prototyp

Die Umsetzung zu einem High-Fidelity-Prototyp (vgl. Abbildung 5.3 mittleres Bild) wurde mittels der Software Axure durchgeführt. Dazu wurde im Voraus eine schematische Struktur des HMI definiert (Abbildung 5.3 links), um den Ansprüchen nach einer konsistenten Gestaltung gerecht zu werden (EN ISO 15005). Der oberste (1) und unterste (5) Bereich sind den Android Standardanzeigen vorbehalten. In (2) wird der Titel der App angezeigt und im Statusbereich (3) werden relevante Informationen präsentiert – Transparenz des Systemstatus (Nielsen, 1994a). Die Hauptansicht (4) beinhaltet die Kartenansicht und die Positionen der Verkehrsteilnehmenden. Die schematische Struktur der Funktionsbereiche entspricht somit anderen Kartenanwendungen, wodurch die Nutzenden mit der Aufteilung bereits vertraut sind. Dadurch wird das Prinzip der Vertrautheit nach Goldstein (2008) ebenfalls eingehalten.

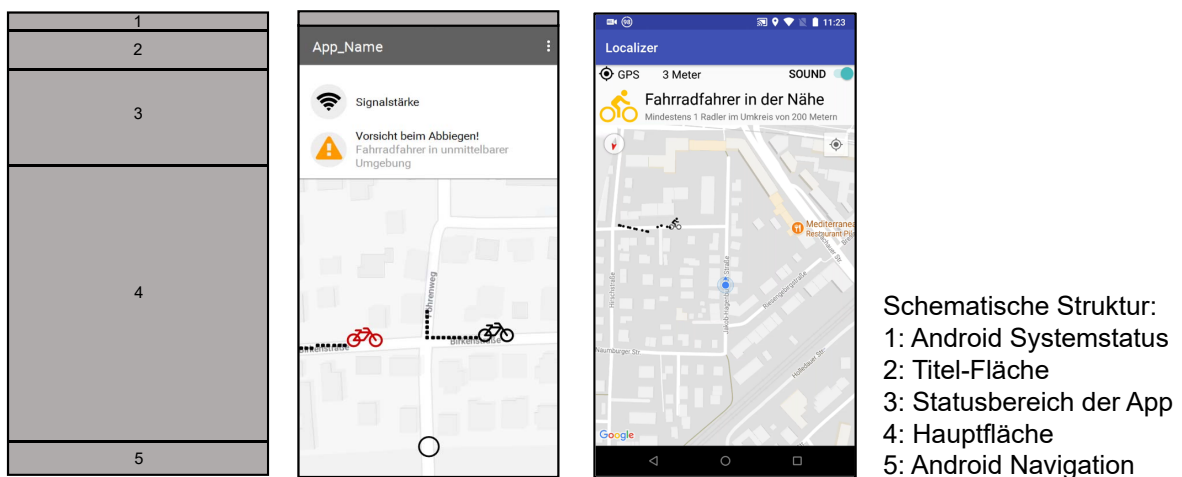


Abbildung 5.3: HMI aus Perspektive der autofahrenden Person; schematische Struktur (Links), die Umsetzung in Form eines High-Fidelity-Prototypen in Axure (Mitte) und die Anwendung als prototypische Android-App (Rechts) (nach Tondera et al., 2018; Winzer et al., 2020).

Bei der ersten Umsetzung als Android-App ist der Statusbereich (3) deutlich zugunsten der Hauptansicht reduziert worden (vgl. Abbildung 5.3). Die Übermittlung eines warnenden Hinweises für die Autofahrenden ist zudem redundant codiert. Es wird ein akustisches Signal in Form eines Signalthorns und visuelle Warnzeichen auf dem Display ausgegeben (vgl. Abbildung 5.4). Für die visuellen Hinweise wird in der Statusleiste (3) ein markantes rotes Ausrufezeichen immer an der gleichen Stelle angezeigt. Zusätzlich wird der prognostizierte Ort einer möglichen Kollision auf der Karte deklariert und der dazugehörige Fahrradfahrende rot eingefärbt. Ein schnelles Wahrnehmen des Hinweises sowie ein Abgleichen und Zuordnen des Ereignisortes in der Realität wird dadurch gewährleistet (Nielsen, 1994a, DIN EN ISO 9241-110).

Die weiteren unterschiedlichen Funktionsausprägungen des HMI sind dabei vergleichbar mit der späteren weiterentwickelten App in Tabelle 5.5. Wie bereits im Unterkapitel 3.3.4 erläutert, wird auf ein Warnen oder Hinweisen für den Fahrradfahrenden aus Sicherheitsgründen verzichtet.

5.2.1.5 Ergebnisse des Feldversuchs

Im Rahmen eines Proof-of-Concept des Android-Prototypen im Feld (München, Moosach: Kreuzung Jakob-Hagenbucher-Straße und Siegmund-Schacky-Straße; siehe Abbildung 5.4) sind durch die Entwickler in 16 gestellten Versuchsfahrten in einem vierstündigen Zeitraum Leistungsdaten zur technischen Evaluierung erhoben worden (siehe Tabelle 5.4). Die Daten der Versuchsfahrten wurden teilweise durch die Smartphones selber, den Backendserver und zusätzlich durch Videokameras dokumentiert. Als Smartphones wurden zwei LG Nexus 5X verwendet. Eines hatte als Netzbetreiber O2 Telefónica und das andere die Deutsche Telekom. Beide waren jeweils mit einer 4G Netzqualität ausgestattet. Zur Standortbestimmung wurde der in beiden Smartphones standardmäßig verbaute GPS-Sensor verwendet. Der Stromverbrauch wurde mittels einer speziellen App¹³ gemessen. In 10 der 16 Versuchsfahrten konnte eine kritische Situation hergestellt werden, wodurch vom Server insgesamt 34 Warnhinweise für die autofahrende Person generiert worden sind.

¹³ Verwendet wurde die App „AccuBattery“: <https://accubatteryapp.com/> [abgerufen am 25.03.2020].

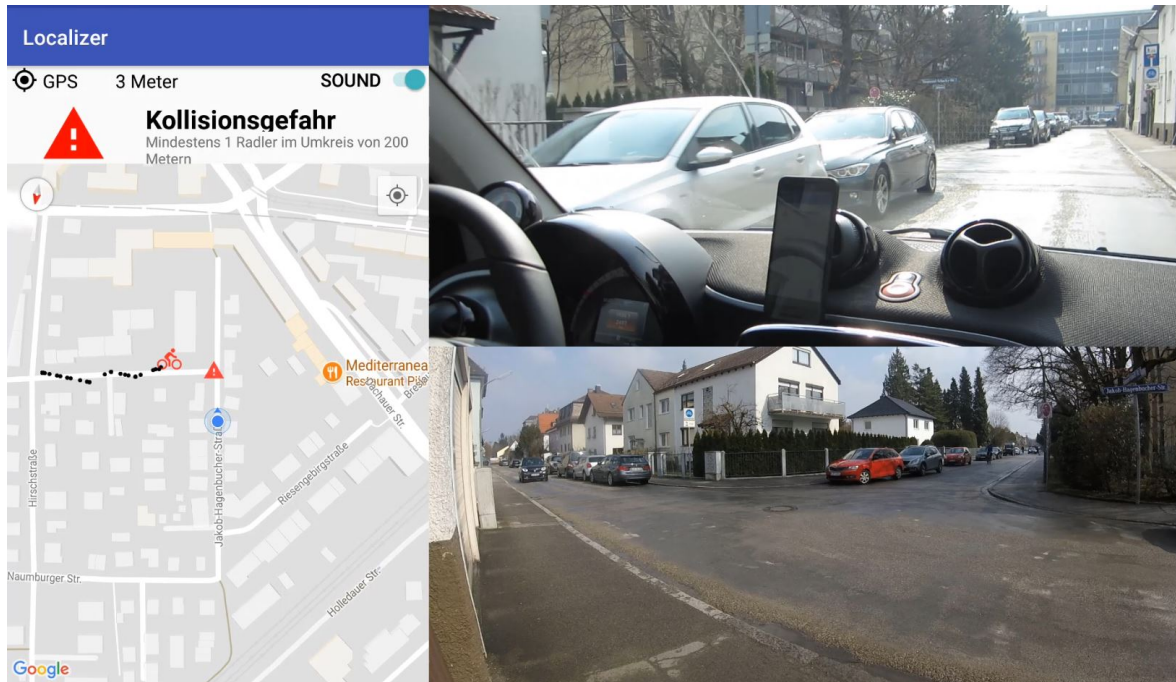


Abbildung 5.4: Zeitpunkt eines Gefahrenhinweises im Feldversuch aus mehreren Perspektiven; Links das HMI der Autofahrenden Person (visuelle und auditive Hinweise); die Perspektive des Autofahrenden rechts oben; Rechts unten die Übersicht des Szenarios (Fahrrad in der Seitenstraße nicht sichtbar vom Auto aus; nach Tondera et al., 2018).

Tabelle 5.4: Übersicht der Ergebnisse des Feldtests zur technischen Überprüfung des Prototypen (über alle Versuchsfahrten; Geschwindigkeit > 0; Anzahl Satelliten > 1; nach Tondera et al., 2018, nach Eliseenkov, 2019).

Metrik	Einheit	Prototyp ^a		Android
		Fahrrad	Auto	Applikation ^b
Energieverbrauch	[mA]	817,5	1042,9	-
Signallaufzeit (Ø)	[ms]	512,63	769,81	450,95
GPS (Ø-Genauigkeit)	[m]	3,37	3,17	7,93
GPS (Ø-Anzahl Satelliten)	[-]	9	9	18

^a Zeitpunkt der Erhebung: 27.03.2018

^b Zeitpunkt der Erhebung: 19.09.2019

5.2.2 Vorstellung der Kollisionsverhütungs-Applikation

Basierend auf den Erkenntnissen des Feldversuchs und den Ergebnissen der ersten Befragung (vgl. Kapitel 5.1) wurde der Prototyp zu einer voll funktionstüchtigen Android-Applikation

weiterentwickelt. Anhand dieser sollen im nachfolgenden Kapitel 5.3 weitere Einflussfaktoren der Akzeptanz untersucht werden. In Tabelle 5.5 sind die relevanten Anzeigen der weiterentwickelten Kollisionsverhütungs-Applikation abgebildet. Weitere Anzeigen zur Aktivierung der Nutzung des GPS-Sensors des Smartphones sowie eine Erläuterung des Unterschiedes zwischen dem GPS-Sensor und dem Google-Standortdienst sind analog des Screen ② in Tabelle 5.5 gestaltet. Das dem definierten Untersuchungsszenario aus Abbildung 4.1 sowie den realen Gegebenheiten des Feldversuches (vgl. Abbildung 5.4) nachempfundene Szenario ist in Abbildung 5.2 dargestellt. Darin verknüpft sind ebenfalls die sieben Anzeigen des HMI aus Tabelle 5.5. Zudem sind in der Grafik die Kriterien zum Ausführen eines warnenden Hinweises (vgl. Abschnitt 5.2.1.2) nochmal hinterlegt.

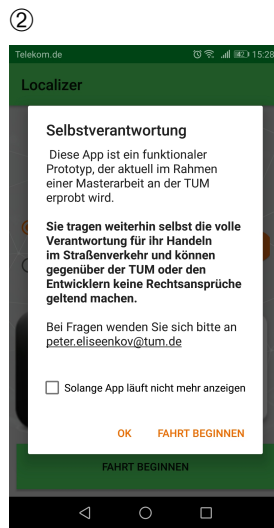
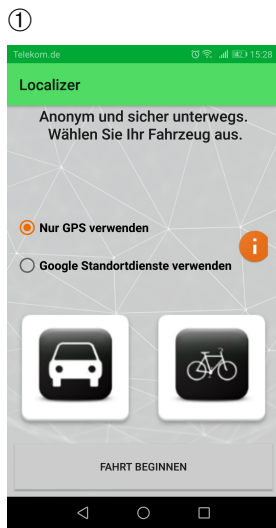
Die Programmierung des Backendserver sowie der App wurde optimiert. Bezüglich des HMI wurde der Prototyp um eine Rückmeldung für die jeweils zurückgelegte Fahrt erweitert (vgl. Tabelle 5.5 Screen ⑦). Damit wird auch der Anspruch des Feedbacks für die Nutzenden nachgekommen (Nielsen, 1994a). Für die Applikation haben sich im Vergleich zum Axure- und Android-Prototyp (vgl. Abbildung 5.3) ein paar Änderungen in der schematischen Struktur ergeben. Die Titelfläche (2) entfällt bei der Fahrtansicht (Screen ④) zugunsten einer größeren Karte in der Hauptansicht (4), da diese auch keine relevanten Informationen enthält. In der Statusleiste (3) wird die numerische Ortungsqualität durch eine dreistufige grafische Darstellung ersetzt. Diese verbessert die Ablesbarkeit.

Im Rahmen einer weiteren Überprüfung im Feld wurden ebenfalls Leistungsdaten an dem selben Knotenpunkt wie bei dem vorangegangenen Feldversuch erhoben. Die Ergebnisse sind in der Tabelle 5.4 in der rechten Spalte „Android Applikation“ hinterlegt. Eine Differenzierung der Clients in Fahrrad und Auto ist ohne zusätzlichen Aufwand gemäß den Datenschutzbestimmungen (vgl. Unterkapitel 5.2.1.3) nicht mehr möglich. Während des zweiten Feldtests war im Vergleich zur ersten Erhebung die durchschnittliche Anzahl an Satelliten doppelt so hoch. Gleichzeitig schnitt die mittlere GPS-Genauigkeit deutlich schlechter ab. Die Signallaufzeit konnte durch die Optimierung der Prozessabläufe im Durchschnitt gesenkt werden. Der Energieverbrauch wurde nicht gemessen.

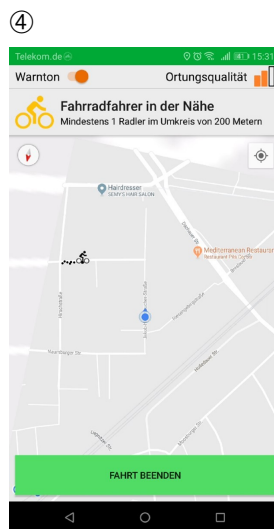
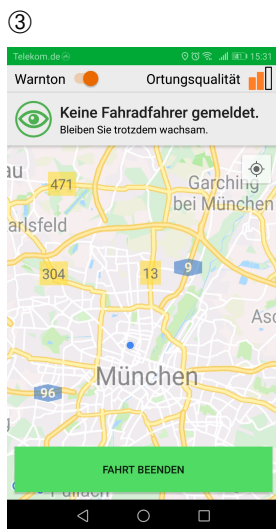
Tabelle 5.5: Ausprägungen der Applikation des HMI (nach Eliseenkov, 2019); Nummerierung nach der Abfolge des beispielhaften Szenarios aus Abbildung 5.2.

Ausprägungen des HMI

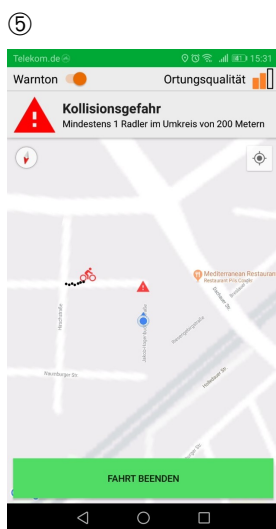
Erläuterungen



Vor Antritt jeder Fahrt und nach dem Starten der App legen die Nutzenden ihre Rolle (Fahrrad oder Auto) als Verkehrsteilnehmende fest ①. In ② wird nochmals darauf hingewiesen, dass jeder selbstverantwortlich handeln muss. Mit Wahl der Rolle des Fahrradfahrens wechselt der Status zur Anzeige ③. Die Karte wird ausgeblendet.



Durch die Wahl der Rolle des Autofahrenden in ① wechselt die Hauptanzeige auf die Kartenansicht und vergrößert den Kartenausschnitt zentriert auf die aktuelle Position. Die Statusanzeige am oberen Kartenrand gibt an, ob sich Fahrradfahrende im näheren Umfeld befinden. In ④ ist ein Fahrrad erkannt worden und wird zusätzlich noch in der Karte angezeigt. Die Punktwolke hinter dem Fahrradfahrer gibt die Bewegungsrichtung wider.




Wenn die Kriterien zum Ausführen eines warnenden Hinweises (vgl. Kapitel 5.2.1) erfüllt sind, dann bekommt die autofahrende Person einen akustischen und visuellen Hinweis. Die Statusleiste zeigt ein Ausrufezeichen an. Der potenzielle Schnittpunkt der prognostizierten Trajektorien wird auf der Karte mit einem roten Warndreieck deklariert und das involvierte Fahrrad wird ebenfalls rot eingefärbt.

Ausprägungen des HMI

Erläuterungen

⑥




Autos werden gewarnt
Ihre anonyme ID für diese Fahrt: 2979


Durch Wahl der Teilnahme am Straßenverkehr mit dem Fahrrad in ① wird der Nutzende darauf hingewiesen, dass autofahrende Personen gewarnt werden. Ansonsten werden dem Fahrradfahrenden keine weiteren Informationen angezeigt.

⑦


Fahrt sicher beendet




Es wurde keine gefährliche Kreuzung(en) auf der Route passiert.




Es wurden 0 Autofahrer auf Sie aufmerksam gemacht.



Ihre Fahrt dauerte 0 Minuten für eine Strecke von 2 Metern




Die beste Ortungsgenauigkeit lag bei 10 Metern, die durchschnittliche bei 11.



Derzeit sind 7 Radfahrer sicher vernetzt unterwegs.

Danke, dass Sie den Verkehr sicherer machen!



ZUR FAHRZEUGWAHL

Mit dem Abschließen einer Fahrt erhält der jeweilige Teilnehmende (Fahrrad- und Autofahrende) ein Feedback zur jeweils zurückgelegten Fahrt. Darin enthalten ist eine Angabe von potenziell kritischen Situationen im Verlauf der Fahrt, die Dauer und die Länge der jeweiligen Fahrt, die Genauigkeit der Ortung sowie die aktuelle Anzahl an Nutzenden im Umkreis.

5.2.3 Zusammenfassung und Diskussion

Die wesentlichen Entwicklungsschritte sowie die daraus resultierenden Ergebnisse des iterativen Entwicklungsprozesses einer Android-Applikation zur Kollisionsverhütung wurden hier dargestellt. Die Applikation erfüllt weitestgehend die allgemeinen Anforderungen der im Unterkapitel 2.5.1 aufgeführten Gestaltungskriterien von Nielsen (1994a) und den entsprechenden ISO-Normen. Jedoch ist kritisch anzumerken, dass gerade die Schriftgrößen und der Umfang der Texte in den Anzeigen Potenzial zur Optimierung besitzen.

Zwei die Entwicklung begleitende Feldtest (siehe Abschnitt 5.2.1.5) zeigten, dass die Funktionalität gegeben ist. Die erfasste Qualität des GPS ist zum zweiten Erhebungszeitpunkt mit der fertigen Android-App schlechter als zum ersten Erhebungszeitpunkt mit dem Prototypen. Die Ursache dafür ist nicht auszumachen. Die Qualität der Ortungsdaten ist vergleichbar mit den berichteten Daten von Liebner et al. (2013) und Thielen et al. (2012). Im Gegensatz zu der Studie von Liebner et al. (2013) ist durch das aktuelle nicht beachten eines Hintereinanderfahrens der Teilnehmenden die Ungenauigkeit des GPS sehr gut zu kompensieren. Die initiierten Gefahrensituationen wurden vom System richtig erkannt und plausibel an die Endgeräte übermittelt. Dies bestätigen auch die zusätzlichen Videoaufnahmen von den Feldversuchen.

Die im Unterkapitel 5.2.1.2 definierten Kriterien zum Ausführen eines warnenden Hinweises sind aus rein theoretischer Betrachtung bereits schon bei einer Distanz von 200 m zwischen den Teilnehmenden möglich. Dies entspricht dem frühest möglichen Zeitpunkt. Kriterium eins ist damit erfüllt. In Abhängigkeit von der Geschwindigkeitsdifferenz der beiden Teilnehmenden (bspw. 15 km/h – Fahrrad: 15 km/h; Auto: 30 km/h) ist damit ein Zeitbudget für beide von knapp 21 Sekunden bis zum Punkt des Aufeinandertreffens möglich. Diese Zeitspanne ist für eine zuverlässige Prognose deutlich zu umfangreich bemessen, da durch Veränderungen der Geschwindigkeit von einem der beiden sich die Gefahrensituation auflösen könnte. Im Gegensatz dazu ist auch ein verhältnismäßig spätes Hinweisen möglich – zeitkritische Warnung im Sinne von S. Winkler et al. (2018). Die aktuellen Kriterien definieren kein minimales Zeitbudget, welches noch vorhanden sein sollte, damit eine Warnung durch die Nutzenden kognitiv verarbeitet werden könnte. Ferner kann im Rahmen einer Weiterentwicklung eine Kaskade – Hinweis bis Warnung – mit

unterschiedlichen zeitlichen Dringlichkeiten unter Beachtung der Forschung von Götze (2018) und S. Winkler et al. (2018) eingeführt werden. Mittels einer solchen Einstufung zeitlicher Kritikalität einer Situation können mögliche Fehlwarnungen reduziert und das Warndilemma nach Winner et al. (2015) besser beachtet werden.

Ferner bietet auch eine Integration auf Seiten des Pkws in das Fahrzeugintegrierte System die Möglichkeit der optimalen Anzeigeposition im Head-Up Display (HUD) zur Reduzierung der visuellen Belastung (Bengler et al., 2018; Götze, 2018).

5.3 Untersuchung von Einflussfaktoren auf die Akzeptanz der Nutzenden bezüglich eines V2X-Systems

Bei der Untersuchung der Akzeptanz von vernetzten Systemen mit dem Schwerpunkt der V2X-Technologie im Unterkapitel 5.1 zeigte sich eine Tendenz der Ablehnung. Zudem konnte aber auch eine Diskrepanz bezüglich des Antwortverhaltens und des tatsächlichen Umgangs mit Standortdaten festgestellt werden (vgl. Unterkapitel 5.1.4).

Die in diesem Unterkapitel dargestellte Studie verfolgt das Ziel, ein tiefergehendes Verständnis bezüglich der Einflussfaktoren auf die Akzeptanz von V2X-Systemen bei den Nutzenden zu erlangen. Basierend auf der im vorangegangenen Unterkapitel 5.2 entwickelten Smartphone-Applikation konnten Videoaufnahmen während des gestellten Einsatzes generiert werden. Diese Aufzeichnungen werden in der weiterführenden Befragung dieses Unterkapitels herangezogen, um ein besseres Systemverständnis bei den Probanden zu generieren. Ferner kann damit die Diskrepanz des Missverstehens reduziert oder sogar aufgelöst werden.

Im Abschnitt 5.3.1 sind die Forschungsfragen und Hypothesen dieser Studie definiert. Der Ansatz zur Messung der Akzeptanz, basierend auf dem im Unterkapitel 5.1 konstruierten Fragebogen, soll nicht weiter verfolgt werden. Vielmehr wird das Konstrukt des CTAM von Osswald et al. (2012) zur Messung der Akzeptanz herangezogen (vgl. Unterkapitel 2.5.2). Dieses basiert ebenfalls auf der Theorie von Davis (1986), ist aber speziell für die Verwendung im Straßenverkehr adaptiert worden. Prati et al. (2018) haben dieses Modell unter anderem erfolgreich bei der Messung der Akzeptanz eines HMI für Fahrradfahrende eingesetzt. Darüber hinaus zeigten Beggiato & Krems (2013) für die Verwendung eines Fahrerassistenzsystems, dass die mehrfache Verwendung – mit zeitlichem Abstand zwischen den Erhebungszeitpunkten – sowie die wahrheitsgetreue Beschreibung im Vergleich zu einer unwahren Erläuterung der Funktionsweise eines Systems das Vertrauen und die Akzeptanz positiv beeinflussten. Insbesondere das eigenständige Erleben und Ausprobieren steigert die UX und damit auch die Akzeptanz (Hartwich et al., 2019). Regan et al. (2014) gab bereits an, dass die Einflussfaktoren der Akzeptanz für ein System durch die Nutzenden sehr vielseitig sind. Welches durch die hier aufgeführten Studien nochmal bestätigt wird.

Diese Studie wurde im Rahmen einer Masterarbeit von Eliseenkov (2019) durchgeführt. Die erhobenen Daten wurden erneut ausgewertet und sind zudem detailliert und tabellarisch im Anhang A.2 hinterlegt. Weiterführende Ergebnisse können zudem Eliseenkov (2019) entnommen werden.

5.3.1 Forschungsfragen und Hypothesen

Die studienbegleitenden Forschungsfragen lauten wie folgt:

- F₁ Ist eine Steigerung der Akzeptanz durch eine intensivere Veranschaulichung und Auseinandersetzung mit der Funktionsweise eines Systems möglich?
- F₂ Wie wirken sich unterschiedliche Erläuterung des Funktionsprinzips auf die Akzeptanz aus?

Ausgehend von den Forschungsfragen sind die im Nachfolgenden aufgeführten Hypothesen definiert worden:

- H_{1,1} Die Verwendung des Systems führt zu einer Steigerung der wahrgenommenen Sicherheit im Straßenverkehr.
- H_{2,1} Der Umfang an Informationen zur Beschreibung der Funktionsweise hat einen Einfluss auf die Akzeptanz.
- H_{3,1} Die Akzeptanz des Systems nimmt zu, wenn das System eine gute User Experience aufweist.

5.3.2 Methodik

Basierend auf den Forschungsfragen sowie den Hypothesen wurde der im Anhang B.1 dargestellte Fragebogen konzipiert. Die grobe Struktur ist der Abbildung 5.5 zu entnehmen. Das dem Fragebogen zugrundeliegende Szenario entspricht der schematischen Darstellung (Abbildung 5.2) der vorausgegangenen Untersuchung.

Im Teil A und B des Fragebogens (vgl. Abbildung 5.5) bekommen die Probanden jeweils ein kurzes Video aus der Perspektive des Autofahrenden gezeigt (kürzer als eine Minute) – zuerst (Teil A) ohne die Applikation und im zweiten Teil (B) mit der Applikation und

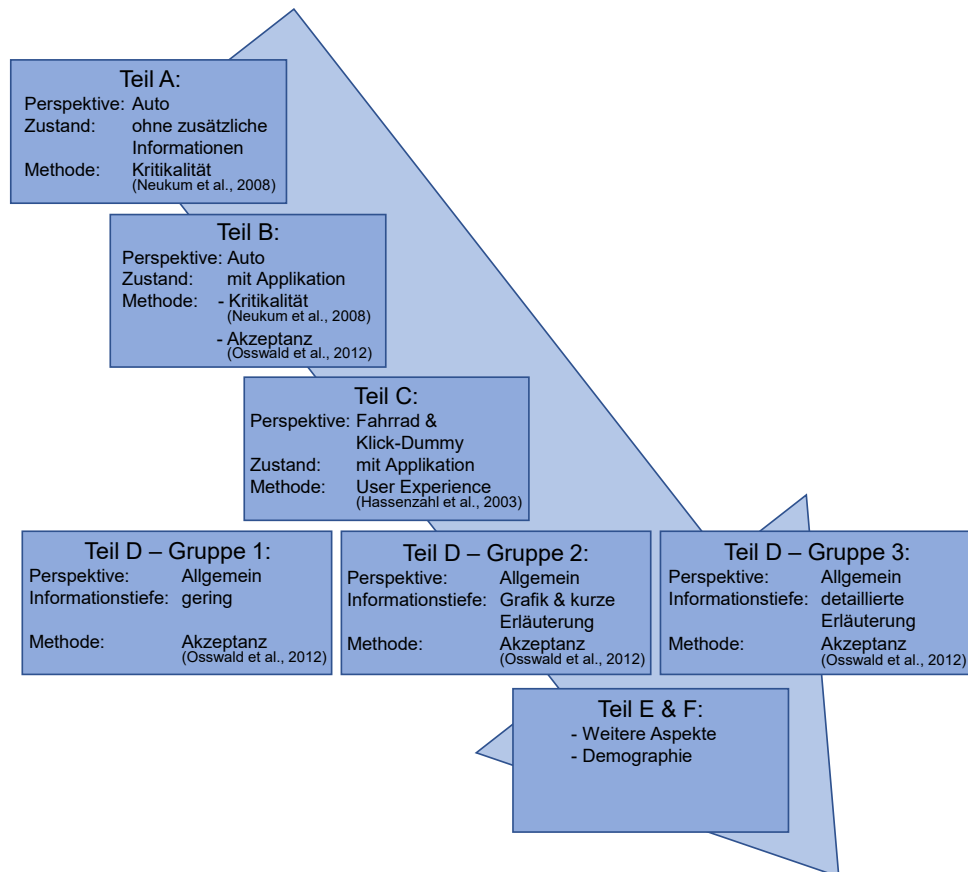


Abbildung 5.5: Thematische Struktur des Fragebogens mit den jeweiligen Perspektiven sowie den verwendeten Methoden.

eines warnenden Hinweises. Die Videos zeigen eine von der linken Seite in eine Kreuzung einfahrende fahrradfahrende Person. Diese wird durch die Umwelt – geparkte Pkws und Bauwerke – verdeckt und ist dadurch erst sehr spät für den Autofahrenden zu sehen.¹⁴

Nach dem Erleben der jeweiligen Szenarien wird zur Erfassung der subjektiv wahrgenommenen Kritikalität die modifizierte Skala von Neukum et al. (2008) verwendet (siehe Tabelle 5.6). Die Anwendung findet dabei in zwei Stufen statt. Zuerst soll eine der groben und verbalen Kategorien (linke Spalte in Tabelle 5.6) ausgewählt werden. Anschließend findet eine detaillierte Differenzierung innerhalb der Gruppe mit den Zahlenwerten statt (rechte Spalte). Limitierend ist anzumerken, dass die modifizierte Variante (Neukum et al., 2008) der ursprünglich von Neukum & Krüger (2003) entwickelten Skala für den Einsatz von Fahr- und Verkehrssituationen auf Landstraßen und Autobahnen konzipiert und evaluiert

¹⁴ Die Videoaufnahmen waren alle gestellte und inszenierte Szenarien. Es kam keine Person dabei zu Schaden oder war einer erhöhten Gefährdung ausgesetzt.

worden ist. Durch die einfache zweistufige Bewertung eines erlebten Szenarios bietet sich ein Methodentransfer an. Eine Interpretation sowie ein möglicher Vergleich mit der von Neukum et al. (2008) erhobenen Daten ist nicht möglich und wird auch nicht vollzogen.

Die Messung der Akzeptanz der Befragten wird mit dem von Osswald et al. (2012) speziell für die Anwendung im Straßenverkehr konzipierten CTAM durchgeführt (vgl. Unterkapitel 2.5.2). Der erste Messzeitpunkt ist nach dem zweiten Video am Ende von Teil B vorgesehen. Verwendet wurden die ins Deutsche übersetzten Items im Anhang B.2. Ergänzt wird der Fragebogen um ein zusätzliches Item, welches als Kontrollvariable dient und nicht in die Auswertung mit einfließt. Daran anschließend wechselt in Teil C die Perspektive für die Probanden vom Autofahren zum Fahrradfahren. Die Befragten erleben die Situation aus der Sicht der fahrradfahrenden Person. Weiterführend wird ein funktionstüchtiger Prototyp (Klick-Dummy) in die Umfrage integriert, um die Applikation auszuprobieren und sich mit dem HMI vertraut zu machen. Im nächsten Schritt wird die wahrgenommene UX gemessen. Für die Erhebung wurde das *AttrakDiff 2* Konstrukt von Hassenzahl et al. (2003) verwendet.

Im Abschnitt D werden die teilnehmenden Personen randomisiert in drei Gruppen eingeteilt und erhalten jeweils eine unterschiedliche Beschreibung der Funktionsweise des Systems (vgl. Anhang B.1). Alle drei Beschreibungen entsprechen dem wahren Sachverhalt. Unterschieden wird in der Darstellungsweise, dem Umfang (der Detailtiefe) und der schriftlichen Ausführung. Basierend darauf findet die zweite Erhebung zur Akzeptanz statt – CTAM: Zeitpunkt 2.

In den beiden letzten Abschnitten werden die demografischen Daten sowie weitere Aspekte der individuellen Einstellung hinsichtlich der Integration eines solchen Systems in andere Anwendungen, die Zahlungsbereitschaft, Mitgliedschaften in sozialen Netzwerken und der allgemeine Umgang mit Allgemeine Geschäftsbedingungen (AGB) erfasst. Der gesamte Fragebogen ist im Anhang B.1 hinterlegt.

5.3.3 Ergebnisse

Der Erhebungszeitraum erstreckte sich auf vier Wochen vom 24.10.2018 bis einschließlich dem 21.11.2018. Zur Auswertung der Daten wurde die Software IBM SPSS 25 und Microsoft Excel verwendet. An der Studie haben sich 228 Personen beteiligt wovon 169

nicht kontrollierbar	10
gefährlich	9
	8
	7
unangenehm	6
	5
	4
harmlos	3
	2
	1
nichts bemerkt	0

Abbildung 5.6: Skala zur Bewertung der Kritikalität von Fahr- und Verkehrssituationen (Neukum et al., 2008).

den Fragebogen vollständig beantwortet haben.¹⁵ Aufgrund des zusätzlichen Kontrollitems beim CTAM und einer kürzeren Verweildauer in einem der entsprechenden Abschnitte als das dazugehörige Video reduziert sich die Anzahl der Probanden auf $N = 143$. Dementsprechend mussten die Teilnehmenden mindestens eine Verweildauer in den jeweiligen Abschnitten von der Laufzeit des entsprechenden Videos aufweisen. Die Zuteilung der Gruppen in Teil D fand randomisiert statt. Aufgrund der Unvollständigkeit einiger Datensätze – diese wurden ausgeschlossen – ergeben sich unterschiedliche Gruppengrößen (Gruppe 1: $N_1 = 61$; Gruppe 2: $N_2 = 45$; Gruppe 3: $N_3 = 37$). Die gesamten tabellarisch aufbereiteten Ergebnisse sind im Anhang B.3 hinterlegt. Im Folgenden sind die wesentlichen und relevanten Ergebnisse dargestellt.

Probandenkollektiv Das Probandenkollektiv besteht insgesamt aus $N = 143$ Personen (93 männlich, 47 weiblich und 3 ohne Auskunft) im Alter von 15 bis 75 Jahren ($M = 33,39$; $SD = 13,59$). Fast 70 % der Befragten wohnen in einer Großstadt mit 100.000 Einwohnern oder mehr. 53 % befanden sich zum Zeitpunkt der Erhebung in einem Beschäftigungsver-

¹⁵ Bei der Dateneingabe des Probanden mit der ID = 275 gab es im letzten Abschnitt (E & F) Schwierigkeiten. Daher wurden folgende Daten händisch ergänzt (Alter, letzter Abschluss, aktueller Beruf, Größe des Wohnortes, Geschlecht und Einschränkung beim Sehen).

hältnis, 43 % waren Schüler und Schülerinnen oder Studierende, 3,5 % bezogen Rente und eine Person hat sich enthalten. An der ersten Befragung (siehe Unterkapitel 5.1) waren bereits fast 6 % der hier Teilnehmenden involviert. Die detaillierten Ergebnisse sind im Anhang B.3.1 hinterlegt.

Kritikalität Die deskriptiven Ergebnisse zu den zwei Messzeitpunkten der wahrgenommenen Kritikalität nach Neukum et al. (2008) sind grafisch als Boxplot Diagramme in Abbildung 5.7 dargestellt. Unter Zuhilfenahme des Systems – Zeitpunkt 2 – wird die Verkehrssituation von den Befragten als unkritischer bewertet. Zum Vergleich der beiden Messzeitpunkte wurde ein Wilcoxon-Test für abhängige Stichproben gerechnet. Die wahrgenommene Kritikalität ist mit System signifikant niedriger (Median = 4) als ohne (Median = 6; asymptotischer Wilcoxon-Test: $z = -8,374$; $p < ,001$; $n = 143$). Die Effektstärke nach Cohen (1988, S. 79 ff.) liegt bei $r = ,70$ und entspricht einem starken Effekt.

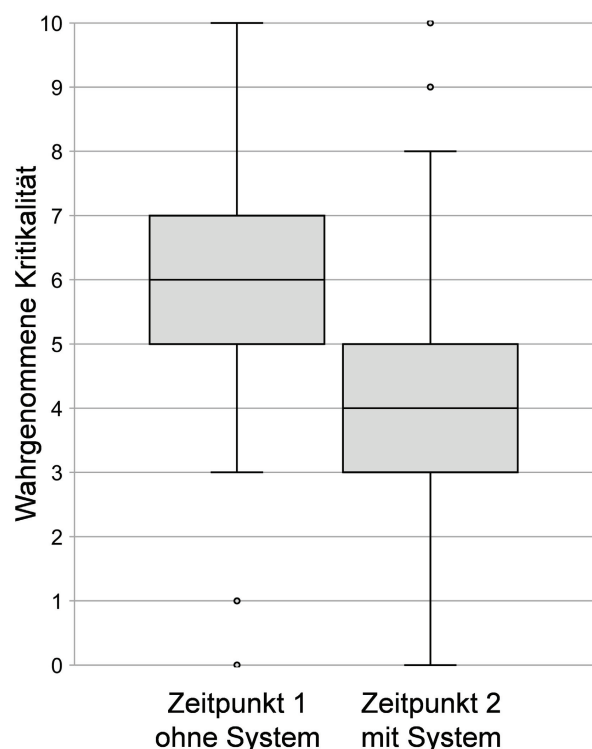


Abbildung 5.7: Boxplot Diagramme zur wahrgenommenen Kritikalität sowohl mit als auch ohne der Applikation (N = 143; nach Eliseenkov, 2019).

User Experience Die Untersuchung der UX nach Hassenzahl et al. (2003) weist im Mittel einen Wert von 0,87 (SEM = ,073) auf einer Skala von -3 bis +3 (7-Punkt Likert-Skala) auf. Nach der Einstufung der Portfolioanalyse (vgl. Abbildung 5.8) besitzt die Applikation einen handlungsorientierten Charakter für den gesamten Konfidenzbereich (Hassenzahl et al., 2008). Die gesamten Ergebnisse sind im Anhang B.3.3 hinterlegt.

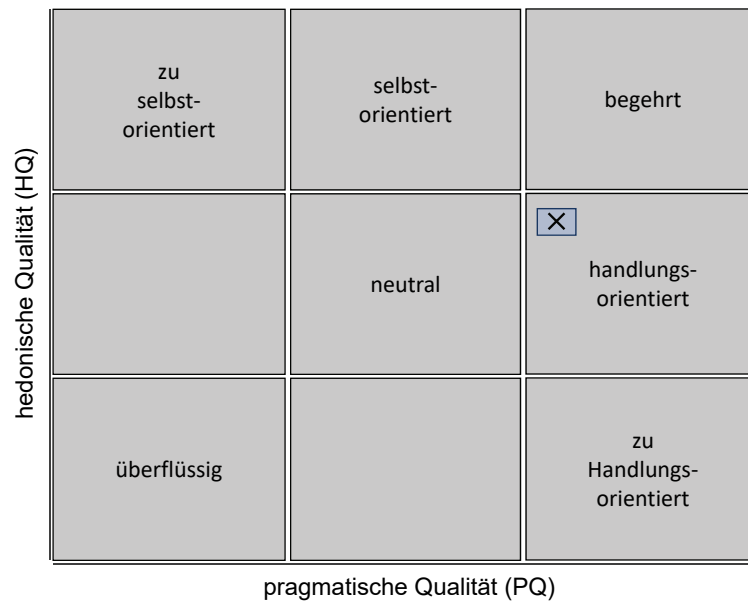


Abbildung 5.8: Portfolioeinordnung des gemittelten Ergebnisses zum AttrakDiff mit 95 % Konfidenzrechteck; die hedonische Qualität ergibt sich aus den Subskalen HQ-I und HQ-S (N = 143; nach Hassenzahl et al., 2008).

Akzeptanz Zur Untersuchung der Akzeptanz ist eine mixed ANOVA mit zwei Erhebungszeitpunkten (vorher und naher) als Innersubjektfaktor und dem Informationsumfang (Niedrig [Gruppe 1], Grafisch [Gruppe 2 – Grafik mit Text] und Hoch [Gruppe 3 – detaillierte Erläuterung]) als Zwischensubjektfaktor gerechnet worden. Die Werte waren für alle Gruppen des Informationsumfangs, bis auf CTAM1-2 (erster Erhebungszeitpunkt, Gruppe: Grafik), normalverteilt, wie eine Überprüfung mit dem Shapiro-Wilk-Test ergab ($p < ,05$). In den Daten konnten vier Ausreißer identifiziert werden. Eine Plausibilitätsprüfung führte zu keinem nennenswerten Unterschied, womit die Ausreißer nicht ausgeschlossen wurden. Die Homogenität der Fehlervarianz zwischen den Gruppen war gemäß dem Levene-Test für alle Variablen erfüllt ($p > ,05$). Die Homogenität der Kovarianzmatrizen war gemäß Box-Test gegeben ($p = ,431$). Es gab keinen statistisch signifikanten Interaktionseffekt zwischen

dem Zeitpunkt und dem Informationsumfang [$F(2,140) = 1,395$; $p = ,251$, $\eta_p^2 = ,02$]. Zwei signifikante Haupteffekte für den Zeitpunkt der Erhebung [$F(1,140) = 94,521$; $p < ,001$; $\eta_p^2 = ,403$] und dem Informationsumfang [$F(2,140) = 3,460$; $p = ,034$; $\eta_p^2 = ,047$] konnten identifiziert werden. Unabhängig von der Art des Informationsumfangs, welche die Probanden erhalten haben, konnte ein signifikanter Unterschied zwischen dem ersten und zweiten Erhebungszeitpunkt festgestellt werden. Die genaue Ursache des Zugewinns der Akzeptanz (vgl. Abbildung 5.9) kann an dieser Stelle nicht festgestellt werden. Ebenso gibt es einen leicht signifikanten Unterschied zwischen den Gruppen unabhängig vom Erhebungszeitpunkt. Die deskriptiven Ergebnisse sind in Abbildung 5.9 grafisch aufbereitet. Über alle Gruppen – Niedrig, Grafisch und Hoch – ist eine Zunahme zwischen dem ersten und zweiten Erhebungszeitpunkt festzustellen. Dieser spiegelt sich auch in der Gesamtbeurteilung unabhängig von der Erläuterung wieder. Auf der Skala von 1 bis 7 erreicht die Akzeptanz zum zweiten Zeitpunkt einen Wert von 4,38 Punkten (Zeitpunkt 1: 4,04 Punkte; siehe Anhang B.3.2).

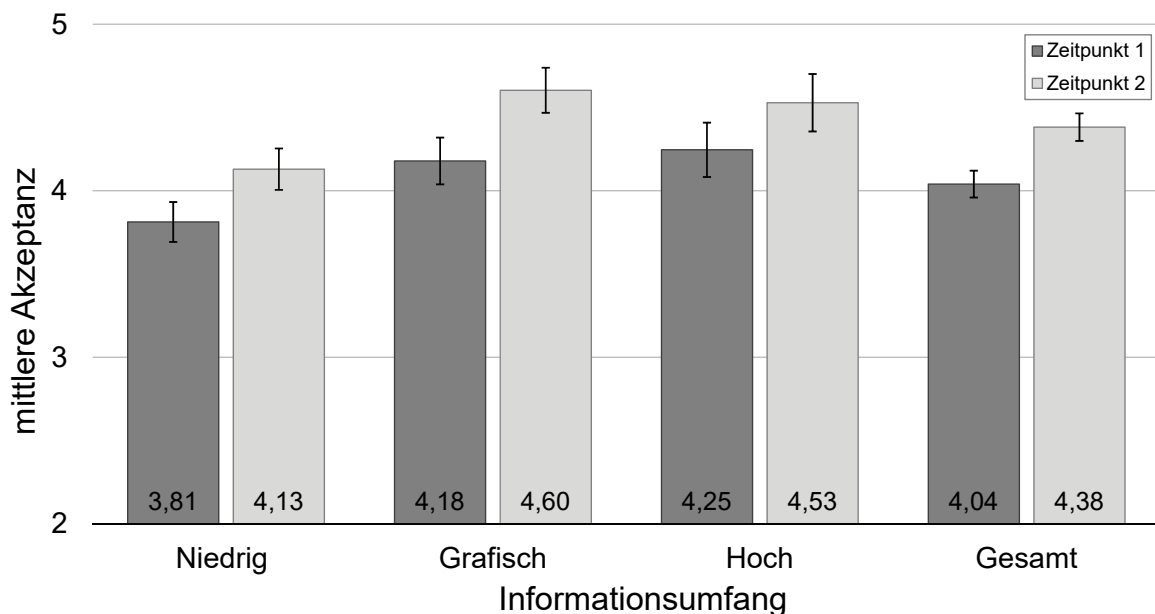


Abbildung 5.9: Deskriptive Ergebnisse (Mittelwerte mit Standardfehler) der beiden Akzeptanzerhebungen mittels des CTAM-Fragebogens; Niedrig $N = 61$, Grafisch $N = 45$, Hoch $N = 37$, Gesamt $N = 143$; nach Eliseenkov (2019).

Weitere Aspekte Die Mehrheit der Befragten möchte mitbestimmen können, ob eine standortbezogene Warnung in anderen Anwendungen, wie beispielsweise einer Navigationsapp integriert werden sollte (Frage E1 - siehe Anhang B.1). Bezogen auf die Frage E2, nach einer denkbaren Plattform, auf welcher die Anwendung eingesetzt werden kann, ist kein bevorzugtes System zu identifizieren. Nahezu alle gegebenen Möglichkeiten wurden gleichermaßen häufig aufgezählt. Die Auswertung zur Häufigkeit der Anzahl gewählter Systeme von jedem Probanden gibt jedoch einen differenzierteren Eindruck. Daraus lässt sich ableiten, dass lediglich 7,69 % der Befragten sich keine Nutzung vorstellen können. Wohingegen 28,67 % für jede der aufgeführten Plattformen offen sind. Zum Startverhalten der Applikation möchte mehr als die Hälfte (55,24%) gerne die Wahl haben, ob sich die Anwendung mittels ihres Bewegungsprofils automatisch startet und im Hintergrund aktiv ist oder manuell gestartet werden muss. Von den teilnehmenden Personen gibt einer an immer die AGB zu lesen, wobei die Mehrheit (74,82 %) sich diese selten oder nie anschaut. Ferner sind knapp 85 % der Befragten in einem oder mehreren sozialen Netzwerken Mitglied. Rund 64 % der Befragten glauben daran, dass die Verwendung einer solchen Anwendung zu einer Steigerung der Verkehrssicherheit führt. Die mittlere Zahlungsbereitschaft beläuft sich auf 2,33 €. Die tabellarisch aufbereiteten Ergebnisse sind dem Anhang B.3.4 zu entnehmen.

5.3.4 Zusammenfassung und Diskussion

Im Rahmen der Studie wurde ein umfangreicher Fragebogen entwickelt, welcher auf mehrere bestehende Konstrukte zurückgreift (vgl. Anhang B.1). Zur Erhebung der Kritikalität wurde eine zweistufige Skala in Anlehnung an Neukum et al. (2008) verwendet. Die Akzeptanz wurde mittels des CTAM von Osswald et al. (2012) erhoben. Der AttrakDiff 2 von Hassenzahl et al. (2008) erfasste die UX der Probanden. Abschließend wurden noch eigen definierte Fragen zur Messung weiterer Faktoren sowie der demografischen Daten konstruiert.

Die erste Hypothese postuliert eine Steigerung in der wahrgenommenen Sicherheit im Straßenverkehr durch die Verwendung der Applikation. Diese Hypothese kann basierend auf der Bewertung einer niedrigeren Kritikalität angenommen werden. Zum zweiten Messzeitpunkt – mit dem System – wird das Szenario signifikant unkritischer gesehen,

wodurch die wahrgenommene Sicherheit gestiegen ist. Zudem gaben knapp 64 % an, sich durch die Verwendung des Systems sicherer zu fühlen, was die Annahme der Hypothese unterstützt (Frage E5, vgl. Anhang B.3.4). Daraus lässt sich ableiten, dass die wahrgenommene Verkehrssicherheit durch die Verwendung der Kollisionsverhütungs-Applikation zugenommen hat. An dem Ergebnis der Kritikalitätsbewertung ist anzumerken, dass die Reihenfolge nicht permutiert wurde. Weiterführend wurde die Skala ursprünglich für den Einsatz von Systemen auf Landstraßen oder Autobahnen entwickelt und nicht für den urbanen Verkehrsraum (Neukum et al., 2008). Demzufolge ist eine Vergleichbarkeit der Kritikalität mit den von Neukum et al. (2008) erhobenen Daten nicht möglich.

Für die Erfassung der Akzeptanz wurde das Konstrukt von Osswald et al. (2012) leicht modifiziert. Die Items wurden ins Deutsche übersetzt und fünf Items waren auf das hiesige System nicht anwendbar und wurden entfernt. Die Struktur des Modells zur Erhebung der Akzeptanz wurde mittels einer Faktorenanalyse geprüft. Sowohl der Bartlett-Test [$\chi^2(496) = 3187,15, p < ,001$] als auch das Kaiser-Meyer-Olkin Kriterium ($KMO = ,914$) weisen darauf hin, dass sich die Variablen für eine Faktorenanalyse eignen. Daraufhin wurde eine Faktorenanalyse mit Varimax-Rotation durchgeführt. Sechs Faktoren weisen einen Eigenwert von größer als 1,0 auf. Der Scree-Plot zeigt einen offenkundigen Knick beim zweiten Faktor. Damit lassen sich mit einem Faktor 31,16 % der Varianz erklären. Das Modell von Osswald et al. (2012) definiert neun Subskalen, welche gemeinsam das Konstrukt der Akzeptanz abbilden – die Subskala *self-efficacy* wurde hier, mangels Anwendbarkeit komplett ausgespart. Die interne Konsistenz mit Cronbachs Alpha = ,946 ist sehr hoch. Eine Reliabilitätsanalyse legt einen Ausschluss der Items FC und PBC2 nahe. Die deskriptiven Ergebnisse der Subskalen sind im Anhang B.3.2 hinterlegt. Die Ergebnisse der ANOVA zeigen keinen signifikanten Unterschied bei der Akzeptanz zwischen den drei Gruppen mit unterschiedlichen Erläuterungen. Im Gegensatz zu Beggiato & Krems (2013) wurde hier keine Kontrollgruppe (mit fehlerhaften Informationen) verwendet sondern nur richtige Informationen mit einer unterschiedlichen Tiefe. Rein deskriptiv betrachtet ergibt sich beim Vergleich des Akzeptanzzuwachses innerhalb der Gruppen die größte Zunahme bei der grafischen Darstellung (0,42 Punkte) mit kurzem Text (Abbildung 5.9, Grafisch). Im Vergleich zu der Studie von Prati et al. (2018) ($M = 3,99$) erreicht das hier verwendete

System zu beiden Zeitpunkten eine bessere Akzeptanz ($M_{t1} = 4,04$ und $M_{t2} = 4,38$). Damit muss die zweite Hypothese verworfen werden.

Unabhängig von den Gruppen hat sich jedoch ein Haupteffekt für den Erhebungszeitpunkt eingestellt. Damit nimmt die Akzeptanz (vgl. Abbildung 5.9) über die Zeit, unabhängig von den gegebenen Funktionserklärungen zu. Dieses Ergebnis steht damit im Einklang vorangegangener Untersuchungen, welche bereits andeuten, dass eine intensivere Auseinandersetzung die Akzeptanz positiv beeinflusst (Beggiato & Krems, 2013; Hartwich et al., 2019). Jedoch ist auch zu beachten, dass zwischen den beiden Erhebungen noch das Szenario aus der Perspektive der fahrradfahrenden Person erlebt wurde und die Applikation in Form eines Prototypen auszuprobieren war. Diese beiden Aspekte beeinflussen ebenfalls das Ergebnis der zweiten Erhebung. Demzufolge ist der signifikante Unterschied des Haupteffekts beim Zeitpunkt nicht nur auf die Beschreibung der Funktionsweise zurückzuführen. Der Unterschied ergibt sich aus der Summe des erlebten Nutzens der Anwendung (Perspektive Fahrrad und ausprobieren der Applikation) und einem tiefergehenden Verständnis zur tatsächlichen Funktionsweise.

Im Allgemeinen fällt die Akzeptanz zum zweiten Zeitpunkt mit durchschnittlich 4,38 Punkte relativ gut aus. Dieses Ergebnis muss jedoch auch unter Beachtung der im letzten Abschnitt erhobenen weiteren Aspekte relativiert werden. Die Zahlungsbereitschaft fällt mit 2,33 € im Vergleich zu Prati et al. (2018) sehr schlecht aus. Ebenso waren 66 Personen bereit die App herunter zu laden und lediglich 9¹⁶ taten dies letztendlich. Bezogen auf den allgemeinen Umgang mit AGB und Datenschutzbestimmungen zeigt sich, dass diese selten bis nie gelesen werden. Eine denkbare Integration dieses Systems in eine bestehende und etablierte Anwendung (bspw. Navigationsapp) oder sogar direkt in das In-Vehicle-Infotainment-System (IVIS) der Fahrzeuge (Pkw und Fahrrad) lehnen die meisten nicht ab.

Nach der Portfolioanalyse (vgl. Abbildung 5.8) besitzt die Applikation eine sehr hohe pragmatische Qualität. Das System unterstützt also die Nutzenden optimal. Diese erreicht unter den vier gemessenen Dimensionen des AttrakDiff das höchste Niveau (vgl. Anhang B.3.3). Die hedonische Qualität besitzt hingegen jedoch noch Verbesserungspotenzial auch

¹⁶ Die App stand im Google-Playstore zum Download bereit. Für Apple Geräte war sie leider nicht verfügbar.

wenn sich diese im oberen Drittel der Handlungsorientierung befindet (Hassenzahl et al., 2008). Nicht im Portfolio abgebildet ist die gemessene Attraktivität. Diese beschreibt das Bedürfnis der Menschen diese Anwendung haben zu wollen. Mit einem Punktwert von $ATT = ,84$ ist diese lediglich leicht überdurchschnittlich und bietet ebenfalls Potenzial zur Verbesserung. Im Allgemeinen liegt die mittlere UX mit 0,87 Punkte etwas oberhalb des Durchschnitts und sollte ebenfalls weiterentwickelt werden. Die gemittelten Auskünfte zum zweiten Erhebungszeitpunkt des CTAM und das Ergebnis des AttrakDiff korrelieren stark positiv miteinander, $r = ,728$; $p < ,001$. Das bedeutet, dass eine gute UX sich positiv auf die Akzeptanz auswirkt, womit die dritte Hypothese angenommen werden kann.

Schlussfolgern lässt sich, dass die Akzeptanz mit 4,38 Punkten bereits einen überdurchschnittlichen Wert angenommen hat. Durch einen intensiveren Kontakt mit dem System nimmt diese stetig zu. Die Probanden äußern Bedenken hinsichtlich des Datenschutzes, gehen aber im Allgemeinen sehr freizügig mit ihren Daten um. Handeln also eher konträr zu ihrem berichteten Verhalten. Dies zeigt sich auch bereits in der ersten Studie (vgl. Unterkapitel 5.1) und bestätigt zudem die Forschungsergebnisse von Sokoll & Herrmann (2020). Als eigenständige Applikation, wie hier erprobt, wird dieses System sehr wahrscheinlich keinen Erfolg haben und somit schlussendlich auch keinen Beitrag zur Verkehrssicherheit leisten können. Vom technologischen Standpunkt betrachtet, ist dieser Ansatz der am Vielseitigsten (Silla et al., 2017). Es können nahezu alle Unfalltypen in Kreuzungsbereichen damit adressiert werden. Jedoch ist zur erfolgreichen Etablierung am Markt die Integration dieses Wirkprinzips in einen akzeptierten Typ von Applikation (Routenführung) notwendig. Dadurch kann die benötigte Marktdurchdringung erreicht werden, damit dieses Wirkprinzip einen Beitrag zur Verkehrssicherheit von Fahrradfahrenden leisten kann.

5.3.5 Zwischenfazit

An dieser Stelle soll ein kurzes Zwischenfazit gezogen werden, da im nachfolgenden Unterkapitel der Fokus nicht mehr auf der Kollisionsverhütungs-Applikation und der bisherigen in diesem Kapitel dargestellten Studien liegt.

Die Untersuchung der Akzeptanz von V2X-Systemen zur Kollisionsverhütung in Abschnitt 5.1 konnte keine klare Auskunft liefern. Die Ergebnisse waren sogar teilweise widersprüchlich. Im Unterkapitel 5.2 konnte eine funktionsfähige Smartphone-Applikation für das Betriebssystem Android entwickelt werden. Zum Zeitpunkt der Studie (Unterkapitel 5.3) stand diese im Google-Playstore zum kostenlosen Herunterladen bereit. Ferner wurden gestellte Videoaufnahmen in München zur besseren Veranschaulichung des Funktionsprinzips generiert. Die zweite Studie zur Untersuchung der Einflussfaktoren der Akzeptanz (vgl. Unterkapitel 5.3) gibt dabei mehr Aufschluss. Die Akzeptanz der Nutzenden steigt mit der Häufigkeit und Intensität der Auseinandersetzung mit dem System an. Durch die Videoaufnahmen, einem Klick-Dummy und der Beschreibung des Funktionsprinzips konnte die Akzeptanz signifikant gesteigert werden. Womit diese ein überdurchschnittliches Niveau von 4,38 Punkten erreichte. Jedoch konnten auch noch Verbesserungspotenziale im Bereich der Gestaltung des HMI (siehe Abschnitt 5.2.3 und 5.3.4) identifiziert werden.

In den bisherigen Studien wurde bewusst auf die Anzeige jeglicher Informationen für die Fahrradfahrenden verzichtet. Dies ist darin begründet, dass es zum jetzigen Zeitpunkt keine Methoden zur Validierung der Straßenverkehrseignung gibt (vgl. Unterkapitel 2.5.4). Insbesondere wenn es sich bei den Anzeigen um sicherheitsrelevante oder zeitkritische Hinweise oder Warnungen handelt.

Nachfolgend werden die Entwicklung und Ansätze der Evaluation eines HMI für fahradfahrende Personen beschrieben. Dazu werden beginnend die Bedürfnisse und mögliche Anwendungszwecke eruiert und anschließend ein gebrauchstaugliches Fahrrad-HMI entwickelt (vgl. Unterkapitel 5.4). Weiterführend wird in einer vergleichenden Studie die Methode der Okklusion (ISO 16673) auf den Kontext des Fahrrads übertragen und dadurch ein erster Versuch der Überprüfung der Straßenverkehrseignung unternommen (vgl. Unterkapitel 5.5).

5.4 Entwicklung eines gebrauchstauglichen HMI für Fahrradfahrende

Aus den beiden Befragungen zur Akzeptanz von V2X-Systemen zur Steigerung der Verkehrssicherheit wurde ersichtlich, dass der direkt unmittelbare Nutzen – meistens in Form von Komfortfunktionen – für die Nutzenden wichtig ist. Grundsätzlich waren die Befragten mit der Funktionsweise sowie dem System zufrieden. Jedoch ist der indirekte Nutzen – das Zustandekommen von gefährlichen Situationen verhindern – zur Steigerung der Verkehrssicherheit nicht für alle als Anreiz ausreichend, um dieses System schließlich auch zu nutzen. Durch einen anderen vordergründigen Nutzen, beispielsweise eines Fitness-Trackers oder der Routenführung, kann der unmittelbare Anreiz für die Nutzung erhöht werden. Damit verbunden können Funktionen der Sicherheit als Teil eines größeren Produktes wirken. Dies entspricht in den Grundzügen auch dem Vorgehen bei der aktuellen Prognose von Verkehrsdichten im Pkw (Klanner & Ruhhammer, 2015).

Eine mit der Fahraufgabe vertretbare Nebentätigkeit und auch ebenfalls in Teilen die Verkehrssicherheit unterstützende Anwendung ist die digitale Routenführung in Form von Navigationsanzeigen. Dabei wird die Belastung des Lesens der Karten und dem Suchen des Wegs durch die digitale Routenführung ersetzt. Bedingt dadurch, dass der Prozess der Wegfindung durch ein Navigationssystem unterstützt wird, sind somit nach Wickens (1984) mehr Ressourcen für die primäre Fahraufgabe verfügbar, was wiederum die Verkehrssicherheit erhöht. Basierend auf dem Ansatz der menschlichen Ressourcenlimitierung und Kompensation ist die Gestaltung von HMIs zur Navigation im Pkw umfassend erforscht worden (Bubb, Bengler, Grünen et al., 2015; Winner et al., 2015). Die Erkenntnisse dieser Forschungsarbeiten resultieren in den im Abschnitt 2.5.1 aufgeführten Richtlinien und Guidelines zur Gestaltung und Evaluation von HMIs im Pkw. Auch in einer der ersten Studien im Bereich zur Fahrradnavigation präferieren die Probanden eine digitale Navigation gegenüber einer Papierkarte. Insbesondere eine digitale und abstrakte Turn-by-turn Anzeige wird bevorzugt (de Waard et al., 2017).

Wie bereits im Unterkapitel 2.5.4 diskutiert, fehlen eben spezielle Richtlinien und Gestaltungsempfehlungen für den gesamten Zweiradbereich. Die deutlichen Unterschie-

de bei der primären Fahraufgabe für Zweiräder unterbinden einen direkten Transfer der Richtlinien (siehe Unterkapitel 3.2). Sie offerieren jedoch die Möglichkeit einer Adaption an die Bedingungen bei Zweirädern. Trotz der Abwesenheit spezieller Gestaltungsempfehlungen wird der gesetzliche Rahmen (siehe Unterkapitel 2.5.1) für die Verwendung von Informationssystemen verwendet, um Produkte auf dem Markt zu platzieren. Eine Übersicht bestehender Systeme zur Steigerung der Verkehrssicherheit für fahradfahrende Personen sind im Unterkapitel 3.3 aufgeführt.

Ziel dieser Studie ist es, die Usability von bestehenden Navigationssystemen, welche für den Einsatz auf dem Fahrrad konzipiert sind, zu analysieren und basierend auf diesen Erkenntnissen und unter Beachtung der ISO/FDIS 9241-210 ein gebrauchstaugliches HMI zur Routenführung zu entwickeln. Die detaillierten Ergebnisse der einzelnen Iterationsstufen können Bandmann et al. (2019) entnommen werden. Nachfolgend sind die zentralen Entwicklungsschritte und deren Ergebnisse dargestellt.

5.4.1 Vorgehen bei der Entwicklung

Die Entwicklung ist an den Prozess zur Gestaltung gebrauchstauglicher interaktiver Systeme der ISO/FDIS 9241-210 angelehnt (vgl. Abbildung 2.2). Das allgemeine Vorgehen dieses Verfahrens ist in Unterkapitel 2.5 beschrieben. Die im Folgenden dargestellte Auflistung gibt einen Überblick darüber, wie der UCDP in dieser Studie (inkl. der verwendeten Methoden) umgesetzt wird.

1. Benchmark bestehender Systeme
2. Nutzungskontext
 - a) Nutzerbefragung
 - b) Definition einer Persona
3. Expertenevaluation (N = 5; Runde 1)
 - a) Aufgabe: Beurteilung von vier bestehenden Systemen
 - b) Methoden:
 - i. Cognitive Walkthrough
 - ii. Heuristische Evaluation
 - iii. Abschlussbefragung
 - c) Schlussfolgerung für die Entwicklung
4. Entwicklung¹⁷
 - a) Erstellung eines Low-Fidelity Prototyps
 - b) Evaluation mit Experten (N = 2)
 - i. Cognitive Walkthrough
 - ii. Abschlussbefragung
 - c) Weiterentwicklung zum High-Fidelity Prototypen
 - d) Evaluation mit Experten (N = 2)
 - e) Fertigstellung des Prototyps
5. Expertenevaluation (N = 4; Runde 2)
 - a) Aufgabe: Beurteilung des entwickelten Systems
 - b) Methoden:
 - i. Cognitive Walkthrough
 - ii. Heuristische Evaluation
 - iii. System Usability Scale (SUS)
 - iv. Abschlussbefragung
6. Auswertung der Ergebnisse

¹⁷ Die beiden Zwischenevaluationen (Punkt b und d) sind vom Ablauf nahezu analog der beiden Haupt-evaluationen. Auf die heuristische Evaluation wurde verzichtet und bei Cognitive Walkthrough kam ein Papierprototyp anstelle eines Videos zum Einsatz.

5.4.2 Navigationssysteme für den Fahrradeinsatz

Bei der Analyse der auf dem Markt befindlichen Systeme konnten drei unterschiedliche Kategorien von Systemen identifiziert werden: *autarke Systeme*, *Smartphone-Anwendungen*, *hybride Systeme*. Systeme in der *autarken* Kategorie zeichnen sich dadurch aus, dass diese ohne eine Datenverbindung zu anderen Systemen funktionieren. Dabei findet die Zieleingabe sowie die Ausgabe der Routenführung direkt am und durch das System statt. Diese Systeme können fest am Fahrrad verbaut oder abnehmbar konzipiert sein. Smartphone-Apps zur Navigation speziell für den Kontext des Fahrradfahrens sind in der Kategorie *Smartphone-Anwendungen* gebündelt. In der Kategorie *hybrider Systeme* sind Routenführungssysteme zusammengefasst, welche ein zusätzlich am Fahrrad befestigtes HMI (kein Smartphone) benötigen, welches jedoch nur durch die Verbindung mit einem Smartphone funktioniert. Dabei nutzen diese Systeme die Technik des Smartphones – bspw. Ortung und Datenverarbeitung – und kommunizieren mit den Nutzenden oder anderen Verkehrsteilnehmenden mittels des zusätzlichen Moduls am Fahrrad – visuelle und akustische Signale. In der Abbildung 5.10 sind exemplarisch zwei unterschiedliche hybride Systeme sowie jeweils ein autarkes und Smartphone basiertes System abgebildet.

Im Rahmen dieser Studie sind vier verschiedene Navigationssysteme ausgewählt worden (siehe Abbildung 5.10). Als Smartphone-Anwendung wurde Google Maps¹⁸ und als autarkes System das Garmin Edge 1000 verwendet. Bei den hybriden Systemen wurden das Beeline¹⁹ und das SmartHalo²⁰ verwendet. Das SmartHalo-System hat dabei das minimalistischste HMI. Der pulsierende grüne Punkt in der Mitte gibt die Aktivität des Systems wieder. Ein bevorstehendes Manöver wird mit weißen LEDs an der entsprechenden Seite angekündigt. Mit der Annäherung an ein solches Event färben sich die weißen LEDs von innen nach außen grün ein. Zum Zeitpunkt des Abbiegens sind alle LEDs grün und blinken mehrfach auf (vgl. Abbildung 5.10, linkes Bild). Das Beeline-System hingegen verwendet keine Farben und gibt nur die direkte Distanz zum Ziel an (vgl. Abbildung 5.10, rechtes Bild). Das bevorstehende Manöver wird mit einem weißen Punkt am äußeren Rand dargestellt. Der Pfeil gibt die aktuelle Richtung zum Ziel an. Dies ist vergleichbar mit der

¹⁸ www.google.de/maps [abgerufen am 14.04.2020].

¹⁹ beeline.co/pages/beeline-velo [abgerufen am 14.04.2020].

²⁰ www.smarthalo.bike/smarthalo1 [abgerufen am 14.04.2020].

Nadel eines Kompasses. Der gesamte Fortschritt wird durch kleine Linien am oberen Rand angezeigt.

Um eine bessere Vergleichbarkeit der Systeme zu gewährleisten, wurden die Navigationssysteme im Einsatz gefilmt²¹ und diese den Experten in unterschiedlicher Reihenfolge präsentiert. Durch die Videoaufzeichnungen erleben alle Experten dieselben Szenarien und können sich vollständig auf das jeweilige HMI konzentrieren, ohne sich parallel der primären Fahraufgabe widmen zu müssen. Das wiederholte Erleben derselben Situationen ermöglicht eine tiefgreifende Analyse. Im Anhang C.2 sind die neun gefilmten Szenarien dargestellt.

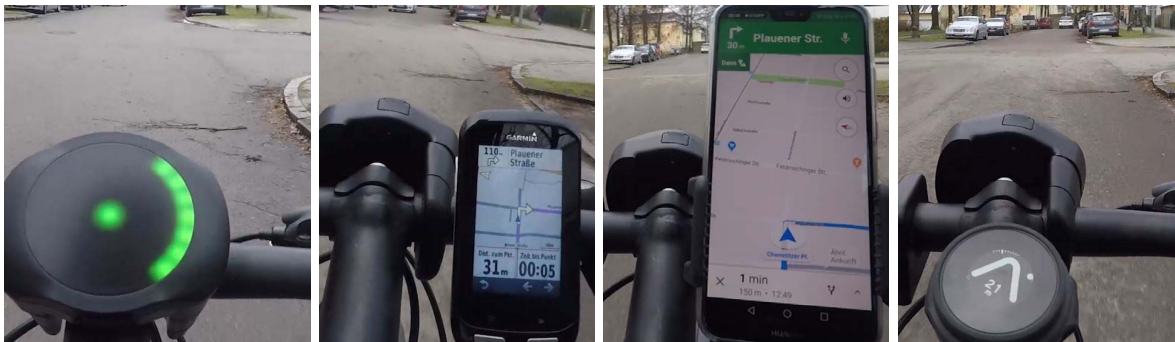


Abbildung 5.10: Übersicht der vier zu evaluierenden Navigationssysteme kurz vor einer Rechtskurve; von links nach rechts: SmartHalo, Garmin Edge1000, Google Maps und Beeline (vgl. Anhang C.2 Szenario 4).

5.4.3 Methodik

In diesem Unterkapitel sind die spezifischen Anwendungen der Methoden und das Vorgehen für die iterative Entwicklung eines Fahrrad-HMI beschrieben. Zur Vorbereitung für die Bewertungen durch die Experten sind im Unterkapitel 5.4.2 die durch eine Benchmark ausgewählten Systeme dargestellt, eine Befragung zum Nutzungskontext durchgeführt (Fragebogen im Anhang C.1.1, Ergebnisse im Abschnitt 5.4.4.1) und eine Persona definiert worden (siehe Anhang C.1.3).

Experten Die zur Evaluierung eingeladenen Experten sind zum Zeitpunkt der Studie alle Mitarbeiter des Lehrstuhls für Ergonomie der Technischen Universität München und

²¹ Aufgezeichnet mit einer GoPro Hero5 Black. Befestigt am Lenker. In einer Auflösung von 2,7K und 24fps.

haben alle umfangreiche Erfahrungen im Bereich der Gestaltung von HMIs. Für die beiden Hauptevaluierungen (Runde 1 und 2, Prozessschritte 3 und 5 des Vorgehens) wurden jeweils die gleichen Experten eingeladen. Einer der fünf Experten stand beim zweiten Durchgang leider nicht mehr zur Verfügung. Während der Entwicklung sind bei den zwei Zwischenevaluierungen (Unterpunkt b und d in Prozess 4) zwei bisher unbeteiligte und damit unvoreingenommene Experten eingeladen worden.

Cognitive Walkthrough Den Experten steht die im Anhang C.1.3 hinterlegte Persona sowie drei spezifische Navigationsszenarien (siehe Anhang C.2 Nr. 4, 5 und 6) mit unterschiedlichen Schwierigkeitsansprüchen zur Verfügung. Die Reihenfolge der Navigationssysteme wurde zwischen den Experten randomisiert. Die Szenarien innerhalb der Videos sind gleichbleibend. Die Videos wurden jeweils unmittelbar vor dem Ausüben eines Manövers pausiert, damit die Experten das Szenario genauestens analysieren können. Die dem Cognitive Walkthrough zugrunde gelegten Fragen zur Analyse einer Aufgabenstellung und Ableitung der jeweiligen Erfolgs- und Misserfolgsstory nach C. Lewis & Wharton (1997) sind wie folgt auf die spezifische Anwendung für ein Navigationssystem in Bandmann et al. (2019, S. 46) angepasst worden:

- „Verstehst du alle Elemente des User Interfaces?
- Wird die nutzende Person erkennen, welche Handlung sie ausführen soll? - Warum?
- Falls nicht, hast du einen Verbesserungsvorschlag?
- Wird die nutzende Person den Fortschritt erkennen, wenn er die korrekte Handlung ausgeführt hat? - Warum?
- Falls nicht, hast du einen Verbesserungsvorschlag?“

Heuristische Evaluation Für die qualitative Bewertung der ausgewählten HMIs werden die 10-Usability-Heuristiken von Nielsen (1994a) herangezogen. Anhand dieser beurteilen die Experten alle 9 Szenarien (vgl. Anhang C.2). Die Reihenfolge der Navigationssysteme wird zwischen den Experten randomisiert. Die Abfolge der Manöver ist hingegen für alle Navigationssysteme gleich. Die Experten sind dazu angehalten, während des Anschauens der Videos durch lautes Aussprechen ihrer Gedanken mögliche Probleme zu identifizieren. Die Einordnung sowie die Schwere der Verletzung wird im Nachhinein vollzogen. Dies

entspricht der Anforderung von Nielsen (1994b) nach der Trennung des Aufdeckens und der Analyse von Problemen. Ein mehrfaches Anschauen der Videos ist ebenfalls möglich. Der letzte Abschnitt einer heuristischen Evaluation dient im eigentlichen Sinne der Verbesserung eines bestehenden Systems, daher wird dieser ausgespart.

Abschlussbefragung Abschließend haben die Experten die Möglichkeit, weitere Aspekte der Verbesserung einzubringen oder auf besonders positive Eigenschaften hinzuweisen. Unterstützt wird die Abschlussbefragung durch zwei von Bandmann et al. (2019, S. 49) definierte Fragestellungen:

- „Ist dir etwas Besonderes aufgefallen oder würdest du gerne noch etwas ergänzen?“
- Ist dir irgendetwas besonders positiv an einem der Fahrradnavigationssysteme aufgefallen?“

5.4.4 Ergebnisse

In diesem Unterkapitel sind die wichtigsten Ergebnisse dargestellt. Weiterführende und tabellarisch aufbereitete Ergebnisse sind dem Anhang C zu entnehmen.

5.4.4.1 Nutzungskontext

Zur Ermittlung des Nutzungskontextes wurde eine Umfrage erstellt anhand derer sich das Nutzungsverhalten ableiten und sich eine Persona definieren lässt. Der dazu erstellte Fragebogen (Anhang C.1.1), die tabellarisch aufbereiteten Ergebnisse (Anhang C.1.2) sowie die definierte Persona (Anhang C.1.3) sind im Anhang C.1 hinterlegt.

Die Nutzerbefragung wurde im Rahmen einer Onlinebefragung vom 14.11.2018 bis zum 26.11.2018 mit der Software SoSci Survey durchgeführt. Der Fragebogen wurde in fahrradspezifischen Facebook-Gruppen und im privaten Bekanntenkreis verteilt. Mit $N = 94$ vollständigen Datensätzen ergibt sich eine Rücklaufquote von 45,9 %. Das mittlere Alter liegt bei knapp 33 Jahren ($SD = 13$ Jahre) und rund 54 % der Befragten sind männlich.

Die Befragten geben an, dass sie vorwiegend ihr Fahrrad in der Freizeit oder zur sportlichen Betätigung verwenden. 66 % nutzten ein Navigationssystem beim Fahrradfahren

und haben dies auch regelmäßig im Einsatz. Dabei wird bevorzugt auf eine Smartphone-App und nicht auf ein zusätzliches Gerät zurückgegriffen. Der häufigste Anwendungskontext des Navigationssystems ist im urbanen Umfeld, da das Fahrrad sehr viel Flexibilität bietet und nachhaltig ist. Für die Befragten ist funktionale Vielfalt (Wahl von alternativen Routen, Tracking des Weges und Aufzeichnen der Fahrperformance), kein zusätzliches Gerät, die Zuverlässigkeit der Anzeigen und eine gut gestaltete Benutzeroberfläche ausschlaggebend bei der Wahl eines Systems. Von den 32 Befragten, die kein Navigationssystem nutzen, sehen rund 41 % keinen Grund für eine Nutzung beim Fahrradfahren und knapp 34 % nutzen keines, weil sie kein Navigationssystem besitzen oder eine entsprechende Halterung für ihr Fahrrad fehlt.

Aus diesen und noch weiteren Faktoren (siehe Anhang C.1) konnte eine Persona (siehe Anhang C.1.3) mit folgenden markanten Eigenschaften abgeleitet werden:

- Männlich, 33 Jahre, weltoffen und berufstätig.
- Nutzt das Fahrrad in der Freizeit und fährt überwiegend im urbanen Umfeld.
- Umweltbewusster Lebensstil.
- Qualität eines Produktes ist wichtiger als der Preis.

5.4.4.2 Expertenevaluation bestehender Navigationssysteme

Im Rahmen der ersten Iteration (Punkt 3 des Vorgehens) haben die fünf Experten eine Vorauswahl an vier Navigationssystemen (vgl. Unterkapitel 5.4.3) mittels des Cognitive Walkthrough, den 10-Usability-Heuristiken und einer Abschlussbefragung evaluiert. Dazu wurde ein Labor an die allgemeinen Anforderungen der Methoden hergerichtet (C. Lewis & Wharton, 1997; Sarodnick & Brau, 2015). Die Videoaufzeichnungen zur Nutzung der Navigationssysteme wurde auf einem 24" Monitor angezeigt. Der präsentierte Videoausschnitt ist für jedes System nahezu identisch. Dieser variiert nur durch die jeweilige bauartsspezifische unterschiedliche Anbringungsart am Lenker (vgl. Abbildung 5.10). In Abbildung 5.11 ist das gesamte Blickfeld, welches die Evaluatoren sehen, beispielhaft für das Garmin Edge1000 dargestellt.

Die Ergebnisse des Cognitive Walkthrough sind in der Tabelle C.2 im Anhang übersichtlich veranschaulicht. Da sich die genannten Aspekte zu den jeweiligen Systemen ähneln,



Abbildung 5.11: Gesamter Bildausschnitt der Videoaufzeichnungen; beispielhaft für das Garmin Edge 1000.

wurden die beiden Systeme mit einer Kartendarstellung sowie die beiden abstrakten Systeme jeweils zusammengefasst. Die Ergebnisse der heuristischen Evaluation sind der Tabelle 5.6 zu entnehmen. Wie bereits beim Cognitive Walkthrough sind die Systeme in zwei Gruppen gegliedert. Für beide Gruppen – abstrakt und kartenbasiert – gab es die meisten Verstöße bei der Übereinstimmung zwischen realer Welt und dem System (Nr. 2). Ferner bieten noch die Heuristiken der Sichtbarkeit des Systemstatus (Nr. 1), der Konsistenz und Standards (Nr. 4) und der des ästhetischen, minimalistischen Designs (Nr. 8) das größte Optimierungspotenzial. Zur Vergleichbarkeit der vier Navigationssysteme untereinander ist ein Bewertungsindex (BI)²² aus der Anzahl von identifizierten Usability-Problemen in Abhängigkeit mit dem jeweiligen Schweregrad eines Problems berechnet worden (siehe dazu Tabelle C.3 und 5.8). Daraus ergibt sich, dass das Google Maps System die geringsten Usability-Probleme aufweist, gefolgt von SmartHalo, Garmin und Beeline (vgl. Anhang C.3).

Ergänzend hatten die Experten zum Abschluss der Untersuchung noch die Möglichkeit, Anmerkungen zu besonders positiven und auch negativen Aspekten der einzelnen Systeme abzugeben. Dabei wurde die Kartendarstellung positiv hervorgehoben, da diese einen besseren Abgleich zwischen realer Welt und System (Nr. 2) bietet, als Fall-Back Ebene bei Unklarheiten dient und von den meisten Menschen auch als vertraut wahrgenommen wird. Eine Zusammenfassung dieser Aspekte ist in der Tabelle C.4 hinterlegt.

²² Der BI berechnet sich wie folgt: $BI = \frac{1}{\text{AnzahlExperten}} * \sum_{i=0}^4 (\text{Verletzungsgrad}_i * \text{AnzahlVerletzungen}_i)$.

Tabelle 5.6: Ergebnisse der heuristischen Evaluation der Referenzsysteme; die Häufigkeit des jeweiligen Verstoßes einer Heuristik ist zusätzlich nach dem Grad der Schwere der Verletzung (1: kosmetisches Problem, 2: geringfügiges Usability-Problem, 3: bedeutendes Usability-Problem, 4: Usability-Katastrophe) gegliedert.

Nr.	Heuristik	Systemart	Grad der Verletzung				Σ
			1	2	3	4	
1	Sichtbarkeit des Systemstatus	kartenbasiert	3	1	4	1	9
		abstrakt	5	2	2	4	13
2	Übereinstimmung zw. System und realer Welt	kartenbasiert	3	6	5	2	16
		abstrakt		4	11		15
3	Benutzerkontrolle und Freiheit	kartenbasiert					0
		abstrakt					0
4	Konsistenz und Standards	kartenbasiert		5	3	1	9
		abstrakt	3	5	2	2	12
5	Fehler vermeiden	kartenbasiert			1	1	2
		abstrakt	1	1	1	1	4
6	Erkennen vor Erinnern	kartenbasiert		1			1
		abstrakt		1		1	2
7	Flexibilität und effiziente Nutzung	kartenbasiert			1		1
		abstrakt		1			1
8	Ästhetisches und minimalistisches Design	kartenbasiert	3	5	3	1	12
		abstrakt	3	2	1	2	8
9	Unterstützung beim Erkennen, Verstehen und Bearbeiten von Fehlern	kartenbasiert		1	1		2
		abstrakt				1	1
10	Hilfe und Dokumentation	kartenbasiert					0
		abstrakt					0
Summe der Verletzungen			21	35	35	17	108

5.4.4.3 Prämissen für die Entwicklung

Die hier dargestellten Prämissen für die Entwicklung des Fahrrad-HMI ergeben sich aus den Erkenntnissen der Expertenevaluation sowie teilweise auch aus den Antworten der Nutzerbefragung. Diese ergänzen die allgemeinen Anforderungen an ein HMI aus Kapitel 2.5.1 und unterstützen die Entwicklung.

- Smartphone als Hardware im Querformat

- Kartendarstellung
- perspektivische Ansicht
- Redundanz in der Darstellung relevanter Informationen
- keine blinkenden Elemente
- Reduzierung der Karte auf das Wesentlichste
- niedrige Komplexität der Anzeige anstreben
- bewusster und gezielter Umgang mit Farben
- klare und übersichtliche Struktur des Interface
- Vorerst: Verzicht auf auditive Ansagen (Timing passte oft nicht)

5.4.4.4 Vorstellung des Fahrrad-HMI Prototyps zur Navigation

Die Entwicklung von einem Papierprototypen bis hin zu dem finalen digitalen Fahrrad-HMI Prototyps (siehe Abbildung 5.12 rechts) wurde durch zwei komprimierte Evaluationen mit jeweils zwei Experten begleitet (siehe Punkt 4 des iterativen Prozesses). Das im rechten Teil der Abbildung 5.12 dargestellt HMI ist ein beispielhafter Ausschnitt aus dem Konzept des High-Fidelity Prototyps. Der digitale Prototyp wurde mit der Software Sketch erstellt. Weitere Anzeigezustände sind dem Anhang C.4 zu entnehmen. Die einzelnen Stufen der Entwicklung sind an dieser Stelle ausgespart und können bei Bedarf im Detail in Bandmann et al. (2019) nachgeschlagen werden. Weiterführende, detailliertere und spezifischere Angaben zum Fahrrad-HMI wie Kontraste und Farbtöne sind im Anhang C.4.2 hinterlegt. Im Folgenden sind die wesentlichen Eigenschaften aufgeführt.

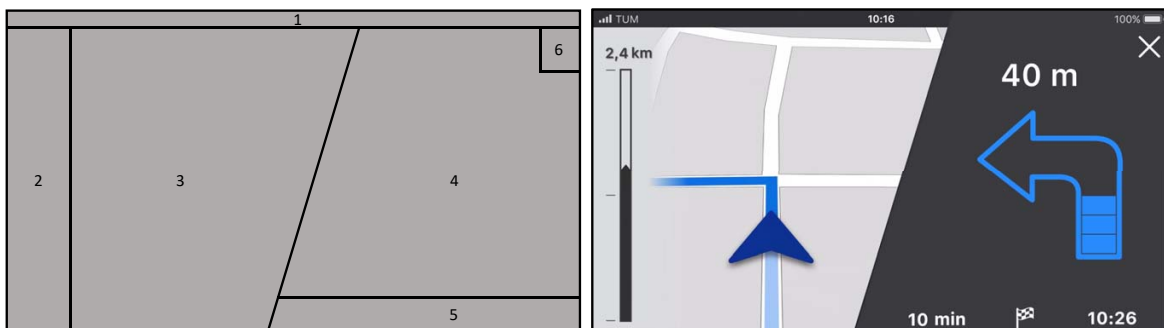


Abbildung 5.12: Links die schematische Struktur des Fahrrad-HMI. Rechts ein beispielhaftes Szenario während der Anwendung (nach Bandmann et al., 2019).

Die präsentierten Informationen sind nach dem Prinzip der Nähe geclustert (vgl. Unterkapitel 2.5.1). Informationen, welche im Zusammenhang zueinanderstehen, werden räumlich nah beieinander dargestellt (Goldstein, 2008). Der obere Bereich (1) ist der Statusleiste des Betriebssystems vorbehalten. Am linken Rand (2) wird der Fortschritt grafisch mit dem sich füllenden Balken und der Distanz zum Ziel angezeigt. Weitere Angaben zur voraussichtlichen Ankunft (Dauer und Ankunftszeit) sind im Bereich (5) hinterlegt. Das Hauptfenster (3) beinhaltet eine minimalistische und perspektivische Kartendarstellung. Dabei ist die Karte auf wenige wesentliche Merkmale beschränkt (keine Straßennamen und keine Point of Interests). Ergänzend zu dem Navigationspfeil in der Kartenansicht wird noch ein schematischer Navigationshinweis im Anzeigebereich (4) ausgegeben. In komplexeren Kreuzungssituationen sind zusätzliche graue Hilfslinien als Landmarken nach Bengler et al. (1994) zur Unterstützung hinzugefügt (siehe Abbildung 5.14). Die Distanz bis zum Ausführen des Manövers ist grafisch – Auffüllen des Pfeiles in 10 m Schritten – und numerisch – oberhalb des Pfeiles – dargestellt. Mit dem Kreuz (6) in der oberen rechten Ecke kann die Zielführung jederzeit beendet werden.

Für die Schriftzüge wurde die serifenlose Schriftart „SF Pro Text“ verwendet²³. Die niedrigste Zeichenhöhe im Fahrrad-HMI hat die Anzeige der verbleibenden Distanz zum Ziel. In Abbildung 5.12 sind es „2,4 km“ mit einer Zeichenhöhe von 1,8 mm. Bei der Verwendung eines 5" Displays entspricht dies bei einem durchschnittlichen Abstand von 50 cm vom Kopf zum Lenker (de Waard et al., 2017) 12,4 Bogenminuten und erfüllt damit die minimale Anforderung der DIN EN ISO 15008.

Gemäß den definierten Prämissen wurden die eingesetzten Farben sehr gezielt ausgewählt. Die Hauptansicht beschränkt sich auf die Farbtöne schwarz, grau, weiß und blau. Zusätzlich kommt vereinzelt noch grün und rot zum Einsatz. Der in der DIN EN ISO 15008 geforderte minimale Kontrast bei Tageslicht von 3:1 kann damit eingehalten werden (vgl. Details im Anhang C.4.2).

Bei der Gestaltung des Wechsels eines abstrakten Navigationshinweises (Element 4 in Abbildung 5.12) vor einem neuen Manöverhinweis, orientiert sich das Design an dem Zeitbudget von Navigationssystemen für den Einsatz im Pkw. Es gibt zwar keinen

²³ <https://developer.apple.com/fonts/> [abgerufen am 17.04.2020].

einheitlichen Zeitpunkt des Beginns eines neuen Navigationshinweises (Kleine-Besten et al., 2015), jedoch hat sich die Distanz von 200 m bis zum Ausführen des Manövers bewährt (Burnett, 1998). Mit einer mittleren Geschwindigkeit bei Pkws von 38,5 km/h in deutschen Großstädten (Hommen, 2019) ergibt sich somit ein Zeitbudget von knapp 18,7 s. Unter Beachtung der beobachteten Durchschnittsgeschwindigkeit von 13,6 km/h von Fahrradfahrenden (Dozza & Werneke, 2014) ergibt sich eine Distanz zur Kreuzung von knapp 70 m. Basierend auf dieser Rechnung findet die optimale Ankündigung eines bevorstehenden Richtungswechsels mit einer Distanz von 70 m vor einem Event statt und nähert sich in sieben Stufen – 10 m Schritten – an. Diese Abstufung ermöglicht die Kompensation möglicher Ungenauigkeiten bei der Positionsbestimmung.

5.4.4.5 Ergebnisse der Expertenevaluation zum Fahrrad-HMI

Bei der abschließenden Evaluation zum entwickelten Fahrrad-HMI (Prozessschritt 5) haben vier der fünf Experten aus der ersten Evaluation das hier entwickelte HMI nach den gleichen Prinzipien analysiert. Ein speziell präpariertes Video mit dem animierten Prototyp wurde den Experten zur Verfügung gestellt. Ergänzend wurde noch die Usability mittels des SUS-Fragebogens gemessen.

Beim Cognitive Walkthrough sind deutlich weniger verbesserungswürdige Aspekte genannt worden. Eine Zusammenfassung der Nennungen aller Experten ist im Anhang C.8 übersichtlich dargestellt. Der überwiegende und von mehreren Experten entdeckte negative Aspekt ist die Art und Weise der Auffüllung des schematischen Navigationspfeils auf der rechten Seite (vgl. Abbildung 5.12, Bereichselement 4). Der sich auffüllende Pfeil kombiniert das Element der Richtungsanweisung und der Distanz bis zum Ausführen des Manövers. Bei der Navigation im Pkw wird dies üblicherweise durch zwei Anzeigeelemente (Richtungspfeil & Entfernungsbalken) realisiert (Bubb, Bengler, Grünen et al., 2015, S. 308). Bei komplexeren Verkehrssituationen führt die aktuelle kombinierte Darstellungsstrategie zu unvorteilhaften Anzeigen (vgl. Abbildung 5.14). Dies liegt darin begründet, dass die Pfeile sich vertikal von unten nach oben in sieben Stufen (10 m je Stufe) auffüllen. Das entsprechende Fahrmanöver ist auszuführen, wenn der Pfeil vollständig aufgefüllt ist. Diese Problematik spiegelt sich auch in den Ergebnissen der heuristischen Evaluation

wider (vgl. Tabelle 5.7). Bei dem zweiten Kriterium, der Übereinstimmung zwischen realer Welt und dem System, sind die meisten Nennungen aufgeführt. Das vierte und achte Kriterium sind die beiden am zweit häufigsten aufgezählten Heuristiken. Dabei wird die Notwendigkeit der Pfeilauffüllung als solches infrage gestellt. Die Auffüllung nicht salient genug ist, das Beenden der Navigation prägnanter sein könnte, die Entfernungsangaben noch zu detailliert sind und dass bei der Wendung auf die Farbe rot verzichtet werden sollte. Zusammenfassend ergibt sich aus den Daten der Tabelle 5.7 ein BI von 6,5 für das entwickelte Fahrrad-HMI.

Tabelle 5.7: Ergebnis der heuristischen Evaluation zum Fahrrad-HMI; die Häufigkeit des jeweiligen Verstoßes einer Heuristik ist zusätzlich nach dem Grad der Schwere der Verletzung (1: kosmetisches Problem, 2: geringfügiges Usability-Problem, 3: bedeutendes Usability-Problem, 4: Usability-Katastrophe) gegliedert.

Nr.	Heuristik	Grad der Verletzung				Σ
		1	2	3	4	
1	Sichtbarkeit des Systemstatus	1				1
2	Übereinstimmung zw. System und realer Welt	2	1	2		5
3	Benutzerkontrolle und Freiheit					0
4	Konsistenz und Standards	1		1		2
5	Feher vermeiden	1			1	2
6	Erkennen vor Erinnern					0
7	Flexibilität und effiziente Nutzung					0
8	Ästhetisches und minimalistisches Design	2	1			3
9	Unterstützung beim Erkennen, Verstehen und Bearbeiten von Fehlern		1			1
10	Hilfe und Dokumentation					0
	Summe der Verletzungen	7	3	3	1	14

Für die Bewertung der Gebrauchstauglichkeit aus Expertensicht wurde der SUS-Fragebogen von Brooke (1996) herangezogen. Der über die vier Experten gemittelte Punktwert beläuft sich auf 89,4 von 100 Punkten (SD = 8,98). Nach der Einstufung von Bangor et al. (2009) (vgl. Abbildung 5.13) weist das entwickelte Fahrrad-HMI eine akzeptable Usability im exzellenten Bereich mit der deutschen Schulnote „2“ (engl. Note: B) knapp vor dem Übergang zur Note „1“ auf.

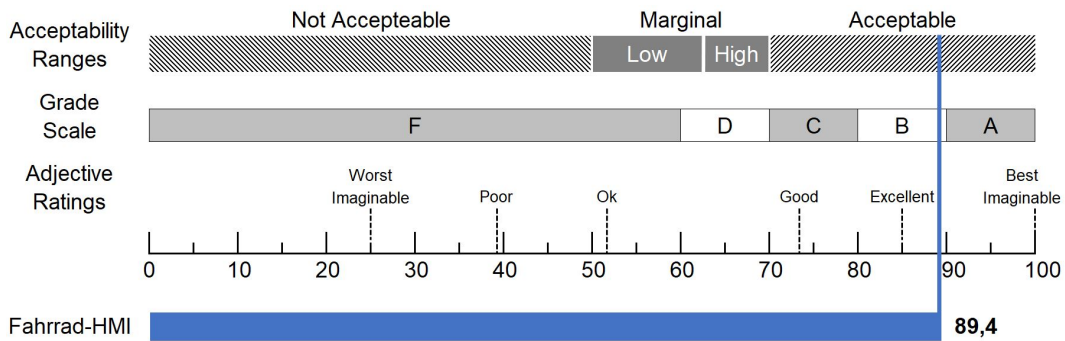


Abbildung 5.13: Einstufung des gemittelten Score des SUS für das entwickelte Fahrrad-HMI nach Bangor et al. (2009).

Wie bereits bei der ersten Iteration hatten abschließend die Experten die Möglichkeit, besonders positive sowie negative Aspekte des HMI hervorzuheben. Das entwickelte HMI wird als minimalistisch, ästhetisch und gut ablesbar wahrgenommen. Die wesentlichen Informationen sind dargestellt. Durch das gewählte Design fehlt es an einer möglichen Individualisierbarkeit bei der Anzeige. Im Sinne der Motivation wurde für die Zielankunft eine Feedbackstatistik vorgeschlagen. Die zusammengefassten Aspekte der Experten sind der Tabelle C.9 zu entnehmen. Ergänzend zum ersten Durchlauf wurden die Experten noch auf die Herausforderung des Auffüllens des Pfeiles (Abbildung 5.14) angesprochen, da dieser Aspekt bereits im Rahmen der Entwicklung für komplexe Abbiegemanöver negativ aufgefallen ist. Dieser Aspekt wurde auch von den Experten erkannt. Jedoch konnte keine einheitliche Lösung definiert werden. Es wurde vorgeschlagen, den Fortschritt durch ein zusätzliches Element – wie im Pkw-Sektor üblich – zu realisieren oder gegebenenfalls inkonsistent in der Auffüllung des Pfeiles zu werden.

5.4.5 Zusammenfassung und Diskussion

Die in diesem Unterkapitel dargestellte Studie beschreibt die iterative Entwicklung und Evaluation eines gebrauchstauglichen Fahrrad-HMI (siehe Abbildung 5.12). Der Prozess ist an das Vorgehen der DIN EN ISO 9241-110 angelehnt. Die Bedürfnisse der Nutzenden wurden im Rahmen einer Befragung erhoben (vgl. Abschnitt 5.4.4.1 und Anhang C.1.1). Das Probandenkollektiv unterscheidet sich von denen in den vorangegangenen Untersuchungen und besteht vorwiegend aus potenziellen Nutzenden – Fahrradfahrende. Darauf

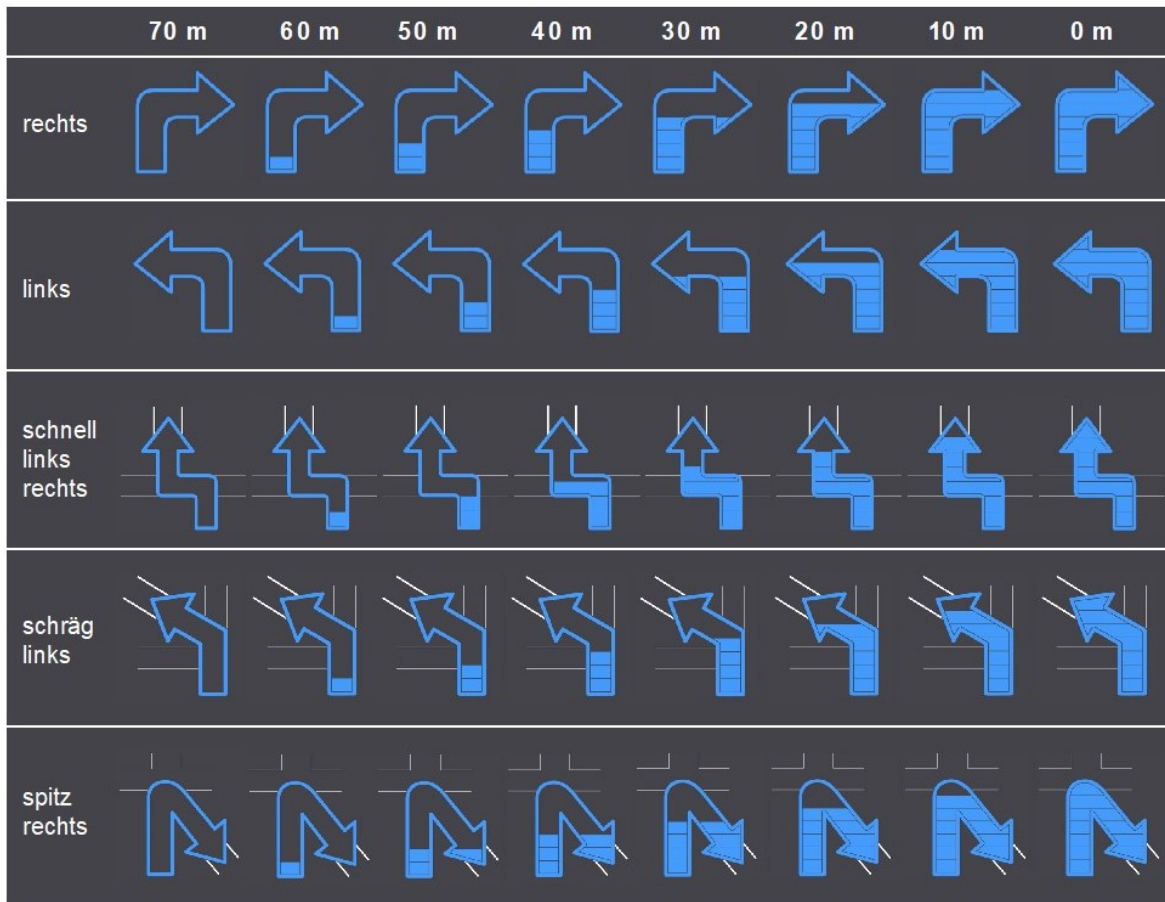


Abbildung 5.14: Auffüllen des Navigationspfeiles in Abhängigkeit von der Entfernung bis zum Ausführen des Manövers (Bandmann et al., 2019).

aufbauend wurde eine Persona definiert (siehe Anhang C.1.3). Zudem wurde ein Benchmark bestehender HMIs zur Navigation für das Fahrradsegment durchgeführt und eine Vorauswahl an Referenzsystemen (vgl. Abschnitt 5.4.2) definiert. Mittels dieser Auswahl wurde eine Expertenbeurteilung zur Identifizierung deren Stärken und Schwächen durchgeführt. Die Entwicklung des Fahrrad-HMI wurde begleitet durch zwei Zwischenevaluationen. Abschließend wurde das entwickelte Fahrrad-HMI nach dem gleichen Vorgehen wie die Referenzsysteme von den Experten evaluiert.

Die Normierung der Ergebnisse zur heuristischen Evaluation in Form des Bewertungsindex (BI) ermöglicht die direkte Vergleichbarkeit der untersuchten Systeme. Tabelle 5.8 stellt die vier Systeme gegenüber und gibt die dazugehörige Rangfolge wider. Die Normierung wurde anhand der Formel 1 vorgenommen:

$$BI = \frac{1}{\text{AnzahlExperten}} * \sum_{i=0}^4 (\text{Verletzungsgrad}_i * \text{AnzahlVerletzungen}_i) \quad (1)$$

Der Tabelle 5.8 ist zu entnehmen, dass das entwickelte Fahrrad-HMI die wenigsten Verletzungen der Heuristiken nach Nielsen (1994a) aufweist. Die meisten genannten Verletzungen sind auf den abstrakten Abbiegepeil zurückzuführen. Dies wird im späteren Verlauf tiefer thematisiert. Die Ergebnisse des Cognitive Walkthrough zum Fahrrad-HMI weisen auch deutlich weniger Aspekte auf, welche verbessert werden sollten. Die Bewertung der Usability mit den SUS-Fragebogen nach Bangor et al. (2009) fällt ebenfalls sehr gut aus (89,4 Punkte – siehe Abbildung 5.13). Die Experten sprechen dem entwickelten Fahrrad-HMI eine sehr gute Gebrauchstauglichkeit zu.

Tabelle 5.8: Ergebnisse des Bewertungsindex zur Vergleichbarkeit der fünf HMIs.

System	BI	Rangfolge
Google Maps	9,8	2
Garmin	15,2	4
SmartHalo	10,2	3
Beeline	17,2	5
Fahrrad-HMI	6,5	1

Bei der Befragung von Fahrradfahrenden sind neben der Routenführung auch noch andere Anwendungen – vorwiegend das Tracking von sportlichen Aktivitäten – sowie das Bedürfnis nach einer großen Individualisierbarkeit genannt worden. Der sportliche Aspekt ist zwar vielen wichtig, ist jedoch nicht die häufigste Nennung. Daher wurde dieser Aspekt erstmals vernachlässigt. Ebenso ist dem Wunsch nach Individualisierbarkeit nur schwer nachzukommen, da diese im Zielkonflikt mit der Prämisse der konsistenten Gestaltung steht und daher zum hiesigen Entwicklungsstand nicht beachtet wird (vgl. Unterkapitel 2.5.1). Für fortführende Entwicklungen könnte jedoch eine teilweise Individualisierung dadurch realisiert werden, dass der rechte Teil des Fahrrad-HMI (4) in Abbildung 5.12 für die Routenführung um unabhängige Informationen – bspw. Fahrperformedaten – erweitert werden kann. Realisiert werden könnte dies beispielsweise über eine seitliche Wischgeste oder eine Konfiguration des HMI über die Einstellungen im Stillstand.

Der abstrakte richtungsweisende Pfeil (vgl. Abbildung 5.14) im rechten Teil des Fahrrad-HMI vereint zwei Funktionen. Zum einen gibt dieser die Richtung des bevorstehenden Manövers an und zum anderen die Entfernung, bis das Manöver ausgeführt werden soll.

In Navigationsanzeigen im Pkw wird dieses üblicherweise durch einen Ladebalken neben dem abstrakten Pfeil dargestellt (Bubb, Bengler, Grünen et al., 2015, S. 308 ff.). Dies hat jedoch ein weiteres Anzeigeelement zur Folge. Bereits während der Entwicklung zeigte sich, dass das Ausfüllen des Navigationspfeils unter Beachtung einer konsistenten Gestaltung in komplexeren Situationen zu uneindeutigen Darstellungen führen kann (vgl. Abbildung 5.14). Insbesondere bei einer Linksrechtskombination oder einer spitzen Rechtskurve wird dies herausfordernd. Bei der Linksrechtskurve kann für einige Nutzende die Heuristik der Übereinstimmung zwischen realer Welt und dem System verletzt werden. Die Nutzenden könnten annehmen, dass sie sich bei halb gefülltem Pfeil zwischen der Links- und Rechtskurve befinden (z. B. Abbildung 5.14, „schnell links rechts“ bei 40 m). Tatsächlich befinden sie sich aber noch vor der ersten Kurve. Auf diese Herausforderung wurden die Experten im Rahmen der Evaluation im abschließenden Teil erneut explizit hingewiesen. Für den Zielkonflikt zwischen einer minimalistischen und konsistenten Gestaltung konnte keine eindeutige Lösung identifiziert werden. Dieser Aspekt sollte im Rahmen weiterführender Probandenstudien untersucht werden. Eventuell kann ein allgemeingültiges inneres Modell identifiziert werden.

In Rahmen dieses Unterkapitels konnte ein Fahrrad-HMI Prototyp mit einer guten Gebrauchstauglichkeit entwickelt werden. Die Vereinigung des abstrakten Manöverpfeils mit einem Ladebalken bis zur Ausführung eines Manövers weist auf weiteres Forschungspotenzial hin, da dieser Aspekt auch in Pkw-Segmenten nicht gelöst ist (Bubb, Bengler, Grünen et al., 2015, S. 308 ff.). Im nachfolgenden Unterkapitel wird basierend auf dem hier entwickelten Fahrrad-HMI ein Transfer der Okklusionsmethode zur Messung der Ablesbarkeit von Informationen aus dem Automobilsektor auf den Kontext des Fahrradfahrens durchgeführt. Damit wird ein erster Schritt zur Validierung der Straßenverkehrseignung des Fahrrad-HMI unternommen.

5.5 Evaluation des Fahrrad-HMI Konzepts

In der vorangegangenen Studie konnte ein gebrauchstaugliches HMI speziell auf die Bedürfnisse der Fahrradfahrenden zur Navigation im urbanen Straßenverkehr entwickelt werden. Für die Entwicklung eines HMIs zum Einsatz im Pkw müssten als Nächstes die ersten Validierungen der Straßenverkehrseignung stattfinden – vgl. Unterkapitel 2.5.2. Dazu beschreibt die NHTSA (2013) beispielsweise ein standardisiertes Versuchsdesign für eine Fahrsimulatorstudie mit festen Grenzwerten zur maximalen Blickabwendung vom Straßenverkehr – bspw. angewendet in Winzer et al. (2018). Neben diesem Verfahren bestehen jedoch auch weitere Möglichkeiten der Evaluierung. Diesbezüglich sind die für und von der Automobilindustrie mitinitiierten Guidelines und Standards (vgl. Unterkapitel 2.5.1) definiert worden. Der in Deutschland dafür gesetzlich geltende Rahmen ist im § 23 StVO (siehe Unterkapitel 2.5.1) festgelegt. Für die Evaluierung eines Konzeptes in einem früheren Entwicklungsstadium bietet das in der ISO 16673 beschriebene Verfahren der Okklusionsmethode die Möglichkeit der Abschätzung einer späteren Straßenverkehrseignung an. Dieses Verfahren gilt als anerkannte Methode, da es die visuelle Ablenkung sehr valide und reliabel misst (Baumann et al., 2004; Bengler et al., 2018; Götze, 2018). Der Geltungsbereich dieser Richtlinien beschränkt sich jedoch nur auf HMIs im Pkw. Für die Anwendung bei anderen Verkehrsteilnehmenden sind diese nicht ausgelegt. Bereits die allgemeine Anwendung auf den Kontext des Motorradfahrens war nicht möglich, da die primäre Fahraufgabe und auch die Belastung durch die Umwelt deutlich größer sind als beim Autofahren (Guth, 2017).

Im Rahmen der in diesem Abschnitt beschriebenen explorativen Studie wird versucht, die Methode der Okklusion auf die Anwendung beim Fahrradfahren zu transferieren. Ziel dabei ist es, die generelle Anwendbarkeit dieser Methode zu überprüfen sowie die Ablesbarkeit des im vorangegangenen Unterkapitel (5.4) entwickelten Fahrrad-HMI im Vergleich zu einem Referenzsystem (Google Maps) zu untersuchen. Der vergleichende Untersuchungsansatz wird gewählt, da keine objektiven Grenzwerte existent sind, gegen die geprüft werden könnte.

Diese Studie wurde im Rahmen der Masterarbeit von F. Winkler (2020) durchgeführt. Weitere und detailliertere Ergebnisse können dem Anhang D und zudem F. Winkler (2020) entnommen werden.

5.5.1 Forschungsfragen und Hypothesen

Zusätzliche visuelle Belastungen, welche auf eine fahrzeugführende Person einwirken, können das Gefahrenpotenzial deutlich steigern (vgl. Unterkapitel 2.4.2). Daher erlaubt der deutsche Gesetzgeber nur eine kurze Blickabwendung vom Straßenverkehr (§ 23 StVO). Aus den internationalen Standards und Guidelines der Automobilbranche haben sich maximale Blickabwendungen von 2 s (NHTSA, 2013) bzw. 1,5 s (EN ISO 15005) etabliert. Diese gelten jedoch nur für das Fahren eines Pkws. Guth (2017) stellte bereits fest, dass diese Grenzwerte nicht auf andere Verkehrsteilnehmer übertragen werden können. Damit existieren keine absoluten Kennzahlen, anhand derer ein HMI für Fahrradfahrende gemessen werden kann. Basierend auf diesen Aspekten ergibt sich die Forschungsfrage:

- F Welche Präsentationszeit ist bei der Okklusionsmethode mindestens notwendig, damit die relevanten Informationen sicher abgelesen werden können?

Die explorative Forschungsfrage wird durch die im Nachfolgenden genannten Hypothesen gestützt:

- H_{1,1} Um die Informationen sicher abzulesen wird eine Anzeigedauer von einer Sekunde benötigt.
- H_{2,1} Längere Anzeigedauern wirken sich positiv auf die Anzahl korrekt abgelesener Informationen aus.
- H_{3,1} Eine höhere Korrektheitsrate beim Ablesen von Informationen kann mittels dem entwickelten Fahrrad-HMI gegenüber dem Referenzsystem erreicht werden.
- H_{4,1} Die wahrgenommene Usability des entwickelten Fahrrad-HMI ist besser als bei dem Referenzsystem.

5.5.2 Methodik

In diesem Unterkapitel ist die Umsetzung der Okklusionsmethode für die Anwendung im Kontext des Fahrradfahrens sowie der genaue Versuchsaufbau und -ablauf beschrieben.

Versuchsdesign Der Okklusionsversuch ist ausgelegt als ein 3-faktorielles Versuchsdesign mit Messwiederholung. Die abhängige Variable ist die Korrektheit der Antworten. Die drei unabhängigen Faktoren sind das Konzept (2 Stufen: Fahrrad-HMI und Google Maps), die Anzeigedauer (4 Stufen: 500 ms, 750 ms, 1.000 ms, 1.250 ms) und die Okklusionsaufgabe (5 Stufen: Fragen siehe Tabelle 5.9).

Tabelle 5.9: Die bei dem Okklusionsversuch zur Anwendung gekommenen Fragestellungen (nach F. Winkler, 2020).

Nr.	Okklusionsaufgaben (Fragen)
A	In welche Richtung erfolgt der nächste Richtungswechsel?
B	Wie groß ist die Distanz zum nächsten Richtungswechsel?
C	In wie vielen Minuten wird das Ziel erreicht?
D	Um wie viel Uhr wird das Ziel erreicht?
E	In wie vielen Kilometern wird das Ziel erreicht?

Okklusionsmethodik Die Okklusionsmethode kann generell in zwei unterschiedlichen Formen angewendet werden. In beiden Varianten der Okklusionsmethode ist die Versuchsperson jedoch ausschließlich mit der Okklusionsaufgabe beschäftigt, die primäre Fahrtätigkeit wird nicht ausgeübt (ISO 16673). Zum einen kann eine sogenannte Shutter-Brille verwendet werden und zum anderen kann die Anzeigedauer der Informationen auf einem Display – Display Blanking – gesteuert werden (ISO 16673). Ersteres bietet sich insbesondere dann an, wenn neben dem Ablesen von Informationen auch eine manuelle Interaktion in Form einer Eingabe (bspw. Radiosender verändern) gewünscht ist. Während der Blindphase – Brille geschlossen; Blick ist im Straßenverkehr und nicht auf dem Untersuchungsobjekt – könnten die Versuchspersonen ohne visuellen Kontakt die Aufgabe weiterführend bearbeiten. Bei einer rein visuellen Aufgabe ist die Display Blanking Variante vorteilhafter, da die Informationen gezielt ein- und ausgeblendet werden können und zudem

auch die Probanden nicht durch das zusätzliche Tragen einer Shutter-Brille belastet werden (vgl. Götze, 2018). Aus der Korrektheit der Antworten kann auf die Ablesbarkeit in Abhängigkeit von der gegebenen Anzeigedauer geschlossen werden. In dem nachfolgenden Versuchsaufbau wird diese Variante der Okklusion verwendet. Für die Anzeigedauern der jeweiligen Konzepte auf dem Display sind als Präsentationszeiten 500 ms, 750 ms, 1.000 ms und 1.250 ms definiert worden. In einem vergleichbaren Versuchsaufbau mit einem Pkw hat Götze (2018) zwar deutlich kürzere Zeiten (200 bis 300 ms) verwendet, jedoch befand sich das Untersuchungsobjekt im HUD deutlich näher an der Sehachse zum Straßenverkehr – bei etwa 4° und damit im parafovealen Sichtfeld (Miličić, 2010). Bei Blickabwendungen von größer 10° ist zusätzlich zur Augenbewegung auch eine Kopfdrehung notwendig (Schmidt, 1988), was theoretisch mehr Zeit bedarf. Eine Vorstudie hat gezeigt, dass mit einer Blickwinkeländerung von rund 55° zu rechnen ist (vgl. Abbildung 5.15). Der tatsächliche Winkel ist jedoch von der Anthropometrie der jeweiligen Versuchsperson abhängig. Auch bei dem Vergleich mit einer Blickabwendung zum Kombiinstrument im Pkw von etwa 17° (Miličić, 2010), ist für das Fahrrad immer noch ein deutlich größerer Winkel notwendig. Basierend auf diesen Erkenntnissen sind die vier oben genannten Anzeigedauern für diese explorative Studie definiert worden.

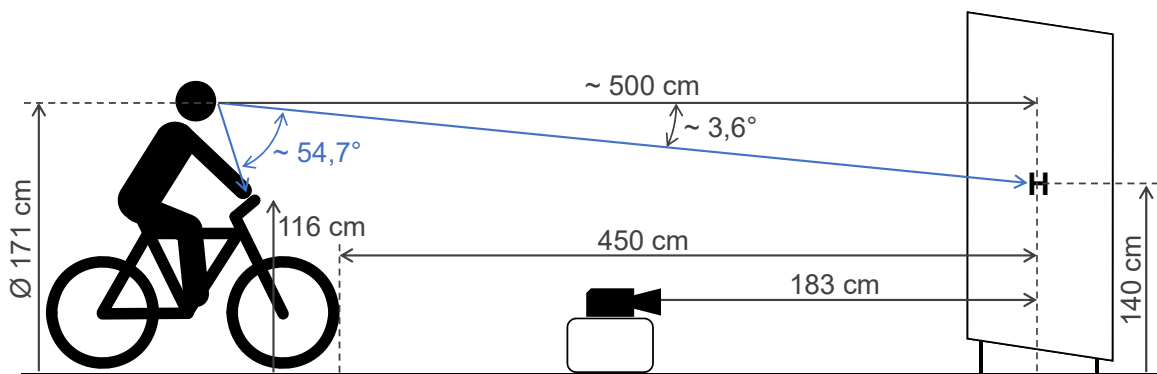


Abbildung 5.15: Schematischer Versuchsaufbau mit den allgemeinen Abmessungen und dem Blickwinkel zwischen Display und Leinwand unter Beachtung der durchschnittlichen Augenhöhe der Probanden (nach F. Winkler, 2020).

Versuchsaufbau Mit Hilfe eines Versuchsaufbaus in einem Labor ist die Studie mit einem vierrädrigen Fahrrad (siehe Abbildung 5.16) realisiert worden. Dadurch kann ein sicheres und stabiles Sitzen der Probanden gewährleistet werden. Eine am Fahrrad angebaute Feststellbremse sowie Holzbalken zur Arretierung an den Reifen verhindern ein Wegrollen oder Losfahren des Fahrrades. Das Fahrrad hat einen Abstand zur Leinwand von 4,5 m, was bei einer Geschwindigkeit von 16,3 km/h einem Sicherheitsabstand von rund einer Sekunde entspricht. Eine halbdurchlässige Jalousie verhindert eine direkte Blendung der Probanden, sorgt aber für ausreichend Licht im Labor. Zusätzlich ist eine diffus strahlende Deckenleuchte, welche zwischen dem Fahrrad und der Leinwand hängt, eingeschaltet. Somit können die Lichtverhältnisse im Labor relativ konstant gehalten werden. Zur Anzeige der beiden Konzepte ist ein 5" großes Display²⁴ am Lenker montiert und wird über den HDMI-Anschluss angesteuert. Die Google Maps Anzeige wird im Hochformat, was für dieses HMI üblich ist und das Fahrrad-HMI im entwickelten Querformat präsentiert. Der Beamer²⁵ wird mit dem gleichen Computer angesteuert, womit eine zeitliche Synchronisierung der Anzeigen möglich ist.



Abbildung 5.16: Versuchsfahrrad (links); Perspektive aus Sicht der Fahrenden mit eingeblenndem HMI (mitte); Darstellung der Fragen auf der Leinwand (rechts) (nach F. Winkler, 2020).

²⁴ Das Display hat eine Auflösung von 800 x 480 Pixel bei 60 Hz mit den Abmaßen von 13,4 x 9,4 cm inkl. Rahmen.

²⁵ Christie DS30 mit 60 Hz.

Versuchsablauf Jeder teilnehmenden Person wird der Versuch und dessen Ablauf erläutert. Die Probanden können sich mit dem Versuchsträger (Einstellen der korrekten Sitzposition – Anleitung wird angereicht), den HMIs und der Okklusionsmethode vertraut machen. Zum Üben der Okklusionsaufgaben (Aufgaben: siehe Tabelle 5.9; Antwortspektrum: siehe Anhang D.1.4) stehen den Probanden für jedes der beiden HMIs ein Trainingsvideo mit Feedback bereit. Der Versuchsablauf sieht vor, dass alle Fragen mit anschließendem Fixationskreuz auf der Leinwand präsentiert werden. Mit dem Ausblenden des Kreuzes wird das jeweilige Anzeigezept auf dem Display am Lenker für eine entsprechende Anzeigedauer (500 ms, 750 ms, 1.000 ms, 1.250 ms) eingeblendet (siehe Versuchsaufbau in Abbildung 5.16). Der Versuch ist in zwei Sektionen (2 Konzepte), jeweils ein HMI pro Sektion, mit einer Pause dazwischen gliedert. Nach jeder Sektion wird den Probanden eine modifizierte Version des PSSUQ²⁶ Fragebogens (siehe Anhang D.1.2) zur Beantwortung gegeben. Eine Sektion besteht aus jeweils fünf Blöcken (5 Okklusionsaufgaben) mit jeweils zehn Trials. Um den Effekt der Task Switching Costs zu kontrollieren, wird innerhalb eines Blocks die Okklusionsaufgabe (siehe Tabelle 5.9) nicht variiert (Monsell, 2003). Durch das wiederholte Ausüben einer gleichen Tätigkeit ist mit einem Lerneffekt (Repetition Priming) zu rechnen (Schacter & Buckner, 1998). Um auch diesen Effekt etwas zu reduzieren, werden die ersten beiden Trials eines Blocks nicht gewertet (vgl. Abbildung 5.17). Daher entsprechen die Trials 1 und 2 eines Blocks den Trials 9 und 10. Es werden somit acht unterschiedliche Trials als Stimuli aus der Kombination von acht unterschiedlichen Displayanzeigen (8 Szenarien; siehe Anhang D.1.3) und zweimal jede der vier Anzeigedauern (500 ms, 750 ms, 1.000 ms, 1.250 ms) den Probanden präsentiert (siehe Versuchsablaufdiagramm in Abbildung 5.17). Jeder Trail ist dabei nach dem gleichen Schema aufgebaut (Abbildung 5.17 rechter Teil). Über beide Sektionen hinweg ergeben sich somit 100 Trials, von denen 80 in die Auswertung mit einfließen. Die Reihenfolge der Sektionen mit der ein Proband beginnt, ist alternierend. Die Okklusionsaufgaben (Blöcke) sind permutiert und es sind aus organisatorischen Gründen zwei unterschiedliche Sequenzen definiert worden. Zwischen den fünf Blöcken sind die Reihenfolge der 8 Szenarien und der 2 x 4 Anzeigedauern randomisiert.

²⁶ Es wird auf die abgewandelte Version von Götze et al. (2013) zurückgegriffen und der Begriff Cockpit ist durch Navigation ersetzt worden.

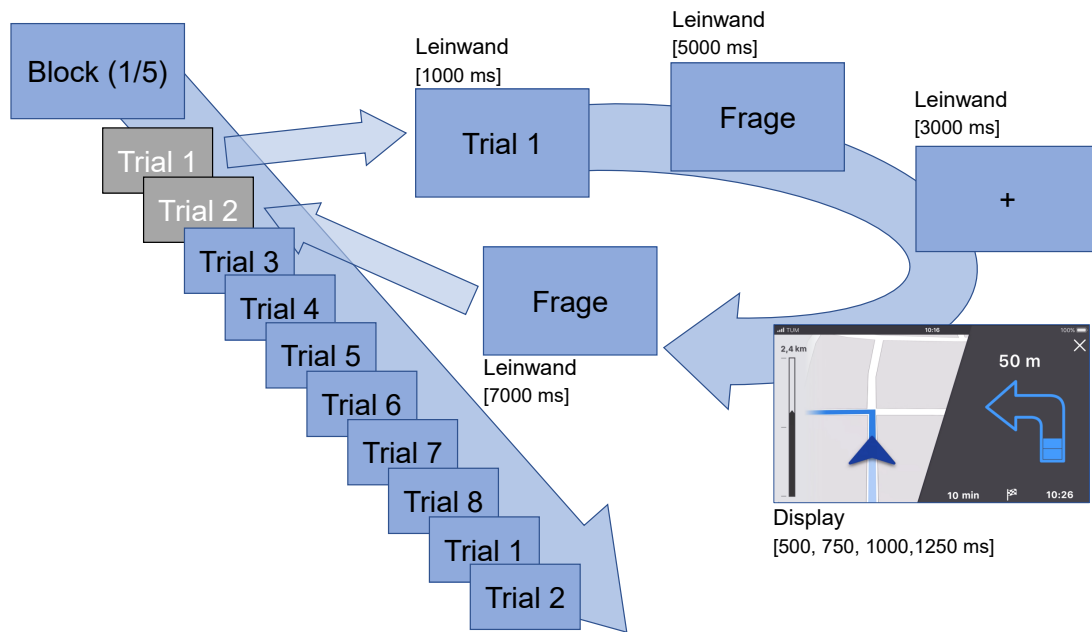


Abbildung 5.17: Versuchsdesign zur Okklusionsmethode in zeitlicher Hinsicht unter Angabe der verschiedenen Anzeigen mit jeweiliger Verortung – grau hinterlegt Trials fließen nicht in die Bewertung mit ein (nach F. Winkler, 2020).

5.5.3 Ergebnisse

Zur Auswertung des Okklusionsversuchs wurde eine 3-faktorielle ANOVA mit Messwiederholung gerechnet. Für die Vergleichbarkeit der Usability der beiden Konzepte ist auf Basis der gemittelten Antworten des PSSUQ-Fragebogens ein t-Test für abhängige Stichproben gerechnet worden. Die Datenauswertung wurde mit Microsoft Excel 365, IBM SPSS 25 und JASP 0.12.2 durchgeführt.

5.5.3.1 Probandenkollektiv

Das Probandenkollektiv besteht aus 32 Versuchspersonen (19 männlich, 13 weiblich) mit einem durchschnittlichen Alter von 26,9 Jahren (SD = 3,95 Jahre) bei einer Altersspanne von 22 bis 43 Jahren. Zwei Probanden berichten von einer Rot-Grün-Farbfehlsichtigkeit. Die mittlere Augenhöhe des Probandenkollektivs liegt bei 171,09 cm über dem Boden mit einer Standardabweichung von 5,03 cm (vgl. Abbildung 5.15). Weiterführende Ergebnisse sind dem Anhang D.2 zu entnehmen.

5.5.3.2 Okklusion

Die deskriptiven Ergebnisse der gemittelten Korrektheitsrate mit Standardfehler sind sowohl einzeln für die beiden Konzepte als auch kombiniert über die vier Anzeigedauern in der Abbildung 5.18 grafisch dargestellt. Dabei wurde die durchschnittliche Korrektheitsrate über alle fünf Okklusionsaufgaben gemittelt. Ab einer Anzeigedauer von größer gleich 1.000 ms schaffen es nahezu alle Probanden, die gefragten Informationen aus beiden Konzepten korrekt abzulesen (98,6 %). Bei der Anzeigedauer von 750 ms liegt die gemittelte Quote bei rund 95,2 %. Durch eine weitere Reduzierung der Anzeigedauer um 250 ms nimmt die Richtigkeit des Antwortverhaltens rapide ab (Google Maps um 39,4 %-Punkte; Fahrrad-HMI um 27,2 %-Punkte; Kombiniert um 33,3 %-Punkte). Zur Untersuchung, welchen Einfluss die unabhängigen Faktoren auf das korrekte Ablesen der Informationen haben, wurde eine 3-faktorielle ANOVA mit Messwiederholung gerechnet.

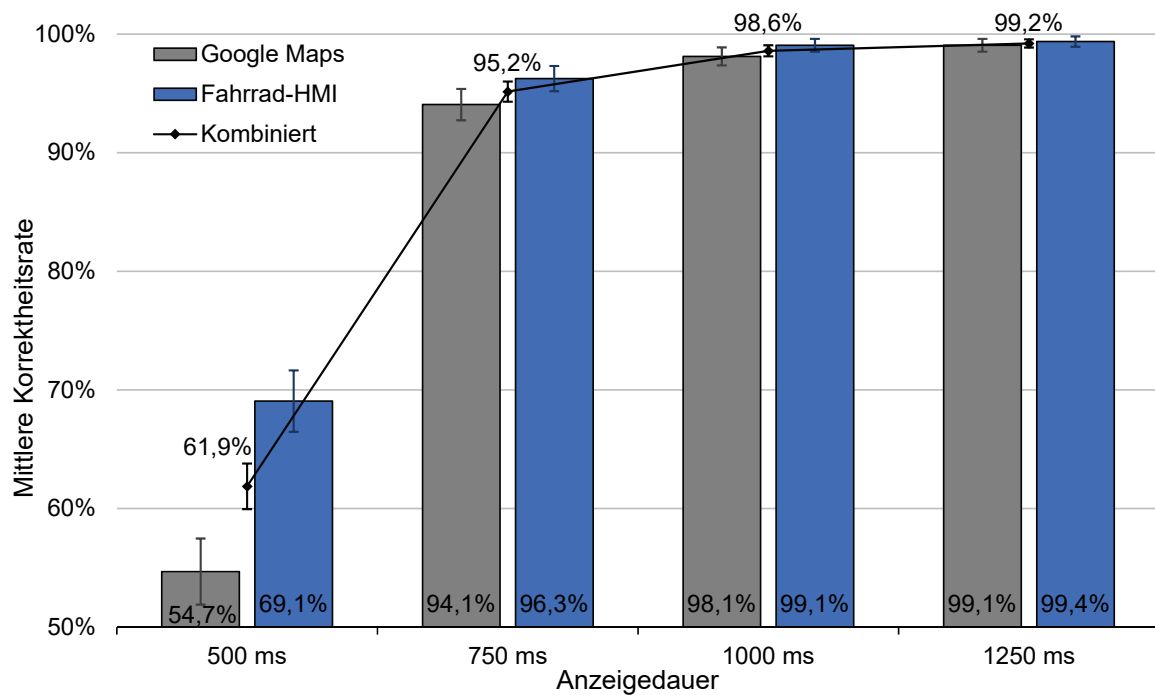


Abbildung 5.18: Mittlere Korrektheitsrate (mit Standardfehler) für beide Konzepte sowie deren gemittelter Wert; unabhängig von der Okklusionsaufgabe aufgetragen über die Anzeigedauern (nach F. Winkler, 2020).

Mauchly's Test auf Sphärizität (siehe Tabelle D.2) ist für die beiden Haupteffekte *Konzept* und *Okklusionsaufgabe* gegeben. Der Haupteffekt *Anzeigedauer* ($\chi^2(5) = 96,92$; $p < ,001$)

und die Interaktionseffekte *Konzept * Anzeigedauer* ($\chi^2(5) = 74,73$; $p < ,001$), *Anzeigedauer * Okklusionsaufgabe* ($\chi^2(77) = 362,56$; $p < ,001$) und *Konzept * Anzeigedauer * Okklusionsaufgabe* ($\chi^2(77) = 314,22$; $p < ,001$) wurden nach Greenhouse-Geisser korrigiert (Girden, 1992). Nach der Empfehlung von Girden (1992) wird die Sphärizitätsverletzung bei dem Interaktionseffekt *Konzept * Okklusionsaufgabe* ($\chi^2(9) = 24,63$; $p = ,003$) nach Huynh-Feld korrigiert. Die für die jeweilige Korrektur verwendeten Epsilonwerte sind in der Tabelle D.2 im Anhang hinterlegt. In der Tabelle 5.10 sind die bereits korrigierten Freiheitsgrade eingetragen.

Die Ergebnisse der 3-faktoriellen ANOVA mit Messwiederholung in Tabelle 5.10 sind für alle Haupt- und Interaktionseffekte mit $p < ,05$ hochsignifikant oder signifikant geworden. Aus diesem Grund wurde für die signifikante Dreifachinteraktion aus *Konzept * Anzeigedauer * Okklusionsaufgabe*, $F(4,93; 152,88) = 3,93$; $p < ,001$, ein post-hoc Test mit Bonferroni-Korrektur durchgeführt. Ferner sind zur tiefergehenden Analyse die fünf Faktorstufen der Okklusionsaufgaben getrennt in Abhängigkeit von den Faktoren Anzeigedauer und Konzept als Liniendiagramme im Anhang D.2.2 grafisch visualisiert worden. Bei der Anzeigedauer von 500 ms ergibt sich für die Aufgaben B und D eine signifikant bessere Ablesbarkeit (jeweils $p_{bonf} < ,001$) für das Fahrrad-HMI im Vergleich zu Google Maps. Die Auswertung der richtigen Ablesbarkeit der Informationen, unabhängig von dem verwendeten Konzept, zeigt bei vier der fünf Okklusionsaufgaben – Aufgaben B bis E (vgl. Tabelle 5.9) – jeweils einen signifikanten Unterschied (jeweils $p_{bonf} < ,001$) von der Anzeigezeit von 500 ms zu den längeren Anzeigedauern von 750 ms, 1.000 ms und 1.250 ms. Das Antwortverhalten bei der Okklusionsaufgabe A – Frage nach der Richtung beim nächsten Richtungswechsel – unterscheidet sich bei den hier verwendeten Anzeigedauern nicht signifikant voneinander.

Bei der deskriptiven Betrachtung, aufgeteilt nach den einzelnen Okklusionsaufgaben (vgl. Liniendiagramme im Anhang D.2.2), zeigen sich die größten Unterschiede zwischen den beiden Anzeigeformaten bei dem Übergang von 750 ms zu 500 ms. Mit einer Anzeigedauer von 750 ms oder mehr sind nahezu keine Unterschiede zwischen den Konzepten zu erkennen. Allgemein ist festzuhalten, dass bei allen Aufgaben außer bei der Frage D für Google Maps – Uhrzeit bei Zielankunft – mit einer Anzeigedauer von 750 ms die

Korrektheitsrate bei über 90 % (Google Maps Nr. C: 88 %) liegt. Die zwei niedrigsten Antwortgenauigkeiten sind bei der Google Maps Anzeige mit 500 ms für die Frage nach der Uhrzeit bei Zielankunft (Nr. D: 20 %) und der verbleibenden Distanz bis zum Ziel (Nr. E: 25 %) identifiziert worden. Die geringste Korrektheitsrate für das Fahrrad-HMI Konzept ergibt sich bei der Aufgabe E mit 41 % bei 500 ms. Ein besonders großer Unterschied zwischen den Konzepten ist bei der Aufgabe B – verbleibende Distanz zum nächsten Richtungswechsel – mit der Anzeigedauer von 500 ms zu erkennen (Google Maps: 66 %; Fahrrad-HMI: 91 %).

Tabelle 5.10: Ergebnisse der 3-faktoriellen ANOVA mit Messwiederholung zu den Haupt- und Interaktionseffekten.

Faktor	Quadratsumme ^a	df	F	p	η_p^2
Konzept	,64	1	17,34	< ,001	,36
Anzeigedauer*	31,03	1,26	239,14	< ,001	,89
Okklusionsaufgabe	6,11	4	57,85	< ,001	,65
Konzept * Anzeigedauer*	1,07	1,40	12,74	< ,001	,29
Konzept * Okklusionsaufgabe**	,39	3,53	3,47	,014	,10
Anzeigedauer * Okklusionsaufgabe*	12,09	4,95	35,42	< ,001	,53
Konzept * Anzeigedauer * Okklusionsaufgabe*	1,08	4,93	3,93	,002	,11

^a Quadratsumme vom Typ III

* Sphärizität verletzt: korrigiert nach Greenhouse-Geisser

** Sphärizität verletzt: korrigiert nach Huynh-Feldt

5.5.3.3 Usability

Die gemittelten Likert-Werte mit den Standardfehlern des modifizierten PSSUQ-Fragebogens (siehe Anhang D.1.2) sind der Abbildung 5.19 zu entnehmen. Bei allen Items schneidet das Fahrrad-HMI Konzept besser ab als Google Maps. Die Items 6 bis 11 sind negativ formuliert, womit hierbei die größeren Werte positiv zu interpretieren sind. Für die statistische Analyse werden die Angaben der Probanden ins Positive transformiert und über alle Items gemittelt. Zur Vergleichbarkeit der subjektiv wahrgenommenen Usability der beiden Konzepte wurde ein t-Test für verbundene Stichproben gerechnet. In dem Boxplot-Diagramm im Anhang D.8 ist ein Ausreißer (entgegen der Effektstärke) für das entwickelte Fahrrad-HMI Konzept zu

erkennen. Da ein Ausschluss dieses Ausreißers keinen Einfluss auf die Interpretation des Ergebnisses hat, wurde dies nicht gemacht. Die Normalverteilung ist nach dem Shapiro-Wilk Test ($W = 0,944$; $p < .097$) überprüft worden. Der t-Test für abhängige Stichproben ergab einen signifikanten Unterschied zwischen der Usability von Google Maps ($M = 3,000$; $SD = 0,877$) und dem entwickelten Fahrrad-HMI ($M = 2,023$; $SD = ,966$): $t(31) = 5,208$; $p < ,001$; $d = .92$. Das entwickelte Fahrrad-HMI hat somit eine signifikant bessere Usability als das Anzeigekonzept von Google Maps.

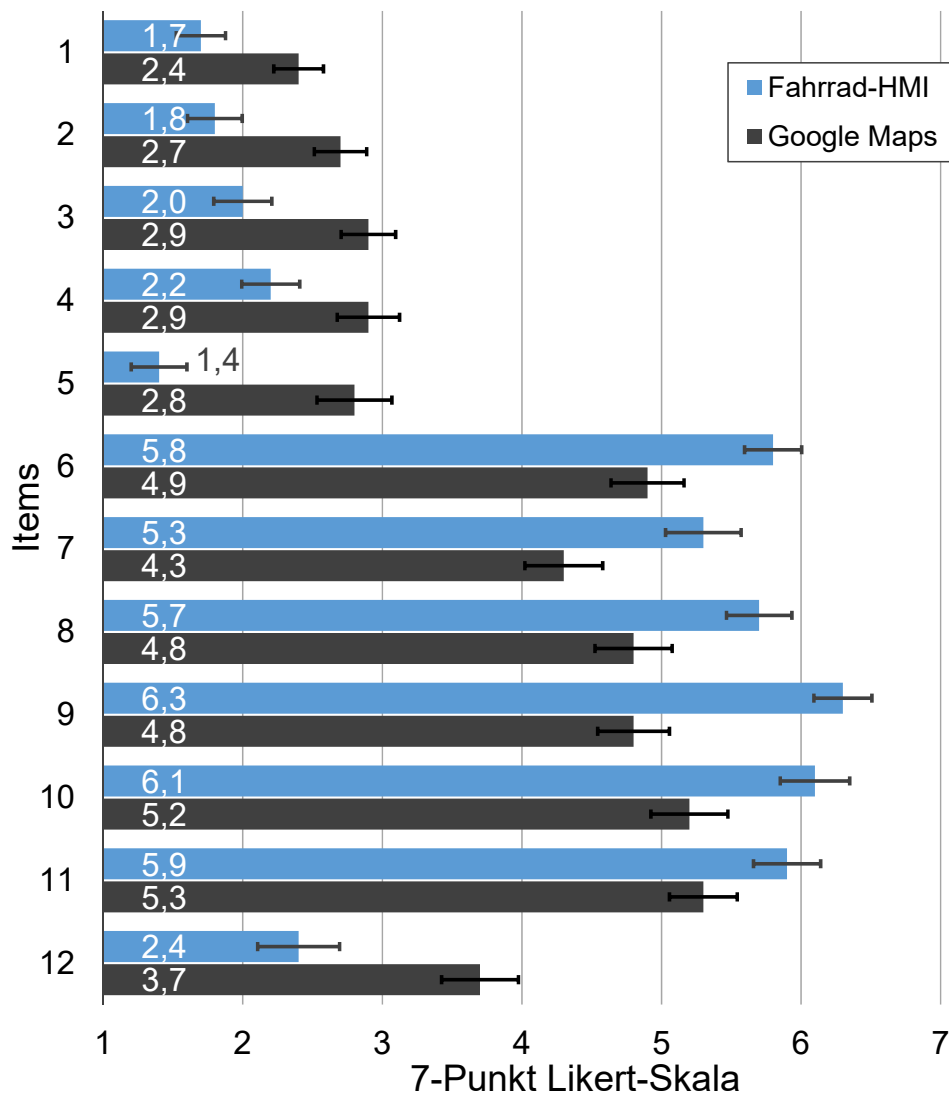


Abbildung 5.19: Ergebnis des modifizierten PSSUQ Fragebogens mit den gemittelten Likert-Werten und dem Standardfehler ($N = 32$; nach F. Winkler (2020)).

5.5.4 Zusammenfassung und Diskussion

Im Rahmen dieser Studie wurde die für den Automobilkontext entwickelte und standardisierte Methode der Okklusion (ISO 16673) für die Überprüfung der Verkehrseignung eines interaktiven Systems erstmalig auf den Kontext des Fahrradfahrens angewendet. Die Ergebnisse legen nahe, dass sich die Methode sehr gut auf die Entwicklung von HMI-Systemen, speziell für Fahrradfahrende übertragen lässt. Geleitet wurde diese explorative Untersuchung durch die Forschungsfrage:

Welche Präsentationszeit ist bei der Okklusionsmethode mindestens notwendig, damit die relevanten Informationen sicher abgelesen werden können?

Die in Abbildung 5.18 dargestellten mittleren Korrektheitsraten für die beiden einzelnen Konzepte sowie auch deren Kombination, aufgetragen über die Anzeigedauer (unabhängig von den fünf Okklusionsaufgaben) offenbart, dass 95,2 % der Probanden die gefragten Informationen bei einer Präsentationszeit von 750 ms richtig ablesen können. Innerhalb von einer Sekunde schaffen es sogar 98,6 %. Demzufolge kann die erste Hypothese angenommen werden. Für zukünftige Weiterentwicklungen ist ein Anstreben höherer Korrektheitsraten für kürzere Präsentationszeiten zu präferieren, da dies eine Steigerung der Verkehrssicherheit bedeutet.

Unter Beachtung der fünf verschiedenen Okklusionsaufgaben zeigt sich, dass sich bei vier der fünf Aufgaben signifikante Unterschiede bei der Korrektheitsrate für die Anzeigedauer von 500 ms zu jeweils 750 ms, 1.000 ms und 1.250 ms eingestellt haben (vgl. Anhang D.2.2). Bei der Aufgabe nach der Richtung des bevorstehenden Richtungswechsels (Abbildung D.3) ergibt sich kein signifikanter Unterschied bezüglich der Anzeigedauer. Den Linienplots im Anhang D.2.2 zur Frage A (Abbildung D.3) ist zu entnehmen, dass die Performance beim Ablesen bei 500 ms noch über 90 % liegt. Im Vergleich zu den Aufgaben D und E (Abbildung D.6 und D.7) – Minimum liegt bei knapp 20-25 % – ist dies noch eine hervorragende Leistung. Begründen lässt sich dies damit, dass die Richtungsanzeige in beiden Konzepten sehr salient gestaltet und redundant codiert ist. Symbolisch als Pfeil und zusätzlich als Linie in der Kartenansicht. Deskriptiv ist auch für die Aufgabe A ein Anstieg der Korrektheitsrate mit Zunahme der Anzeigedauern zu verzeichnen. An der Hypothese,

dass eine längere Anzeigedauer einen positiven Einfluss auf die Richtigkeit der Antworten hat, kann festgehalten werden.

Die dritte Hypothese postulierte eine höhere Korrektheitsrate beim Ablesen von Informationen für das entwickelte Fahrrad-HMI im Vergleich zu Google Maps als Referenzsystem. Basierend auf den erhobenen Daten muss diese Hypothese verworfen werden. Lediglich bei zwei Paarvergleichen (Aufgabe B und D) konnte ein signifikanter Unterschied bei der ANOVA identifiziert werden. Ein deskriptiver Vergleich der beiden Konzepte auf Basis der mittleren Korrektheitsraten für die unterschiedlichen Anzeigedauern zeigt, dass das Fahrrad-HMI elfmal und Google Maps dreimal am besten abschneidet – vgl. Linienplots im Anhang D.2.2. In sechs Fällen erreichen beide Konzepte die gleiche Leistung. Auffällig ist die besonders gute Performance beider Konzepte ab der Anzeigedauer von 750 ms und länger. Demnach ist es für zukünftige Studien interessant, die Anzeigedauer an die von Götze (2018) verwendeten Anzeigedauern anzunähern, um gegebenenfalls einen Unterschied zwischen den Konzepten festzustellen.

Beide Systeme erreichen im Okklusionstest vergleichbare Leistungswerte und erfüllen damit die Anforderungen nach kurzen Blickabwendungen des § 23 StVO. Die Bedeutung dieser Ergebnisse, bezogen auf die tatsächliche Eignung für den Einsatz im Straßenverkehr ist jedoch auch kritisch zu hinterfragen. Die Okklusionsmethode profitiert von ihrer einfachen und unkomplizierten Anwendung (Baumann et al., 2004). Bezogen auf den Kontext des Fahrradfahrens ist zu hinterfragen, ob die Methode in ihrer hier dargestellten Form valide Ergebnisse liefern kann. Die Methode erhebt die minimale benötigte Blickzuwendungszeit unter Laborbedingungen bei Ausschluss weiterer Tätigkeiten. Übertragen in den realen Verkehr bedeutet dies, dass ein basierend auf der Okklusionsmethode definierter Grenzwert die maximale Blickabwendungszeit vom Straßenverkehr darstellt. Begründet liegt dies darin, dass bei der Verwendung im Straßenverkehr die Nutzenden zusätzlich durch die äußeren Umwelteinflüsse und die primäre Fahraufgabe belastet sind. Wie bereits im Unterkapitel 3.2 aufgeführt, unterscheiden sich die Belastung des Fahrradfahrens vom Autofahren. Bezogen auf die Methode der Okklusion ist somit die Anzeigedauer der entscheidende Faktor. Anzeige Konzepte für Fahrräder sollten in einer deutlich kürzeren Zeit sicher ablesbar sein als für den Einsatz im Pkw. Im Vergleich zu Götze (2018) ist dies aktuell nicht der Fall. Die

deutlich vorteilhaftere Position des HMI im HUD erhöht die Ablesbarkeit bei sehr kurzen Anzeigedauern – dies zeigte sich bereits schon beim Vergleich von Anzeigepositionen im Pkw (vgl. Miličić, 2010). Auf dem Fahrrad benötigt der deutlich größere Blickwinkel vom Straßenverkehr zum Display am Lenker sehr viel Zeit (vgl. Abbildung 5.15). Ebenfalls bisher noch unbeachtet sind umweltbedingte Einflussfaktoren (bspw. Blendungen, Vibrationen durch unebenen Untergrund, Regen – oder Wetter im Allgemeinen), welche den Prozess des Ablesens negativ beeinflussen können. Diesbezüglich sind somit weiterführende Untersuchungen notwendig, um herauszufinden, bis zu welcher Anzeigedauer es vertretbar ist Informationen abzulesen, ohne dass die Verkehrssicherheit nachhaltig beeinflusst wird.

Bezogen auf die Usability haben bereits bei der Entwicklung die Experten dem Fahrrad-HMI eine sehr gute Usability zugesprochen (vgl. Unterkapitel 5.4.4). Auch die Beurteilung durch die Probanden war im Durchschnitt für die einzelnen Items durchwegs positiv. Im Vergleich zum Anzeigeconcept von Google Maps konnte eine signifikant bessere Usability erreicht werden. Bei der Interpretation des modifizierten PSSUQ-Fragebogens sind jedoch zwei Effekte zu beachten. Zum einen ist Google Maps eine der bekanntesten Applikationen zur Navigation, wodurch Personen nach dem Mere-Exposure-Effekt dazu neigen, Bekanntes Unbekanntem vorzuziehen (Zajonc, 1968). Zum anderen ist es für die Probanden offensichtlich, welches Konzept entwickelt wurde und im Sinne der sozialen Erwünschtheit wird dieses dann positiver bewertet (Esser, 1991). Jedoch zeigt die Auswertung für das Fahrrad-HMI Konzept auch einen negativen Ausreißer (siehe Boxplot im Anhang D.2.3). Durch den Ausschluss würde sich die positive Bewertung des Konzepts noch einmal verstärken. Um jedoch eine Verzerrung der Ergebnisse zu vermeiden, wurde der Ausreißer nicht ausgeschlossen. Basierend auf diesen Ergebnissen kann die vierte Hypothese angenommen werden.

6 Zusammenfassung und Diskussion

Das Ziel dieser Arbeit war es zu untersuchen, wie ein HMI-Konzept auf der Plattform eines Smartphones unter Verwendung der V2X Kommunikationstechnologie zur urbanen Verkehrssicherheit von Fahrradfahrenden beitragen kann. Ferner sollte das Konzept universell anwendbar sein und bei den aktuell bestehenden technischen Gegebenheiten funktionieren. Die Analyse von Unfalldaten (vgl. Unterkapitel 2.3) zeigt, dass ein großer Teil der Fahrradunfälle in Kombination mit anderen Teilnehmenden – meistens Pkws – passieren. Dieser Aspekt spiegelt sich auch bei der Analyse bestehender aktiver Sicherheitsmaßnahmen (vgl. Unterkapitel 3.3) wider. Ebenso wirken auch die Aspekte der Ablenkung von der primären Fahraufgabe bei Fahrradfahrern auf die Fahrenden ein. Gerade mit der aktuellen Popularität des Smartphones sind visuelle-manuelle Nebentätigkeiten während des Fahrradfahrens in den letzten Jahren vermehrt dokumentiert worden (vgl. Unterkapitel 2.4.2). Bezugnehmend auf die Forschung zur Gestaltung von Anzeige Konzepten im Pkw sind sehr viele Erkenntnisse in Form von Richtlinien und Methoden vorhanden (vgl. Abschnitt 2.5.1). Jedoch konnte gezeigt werden, dass ein direkter Transfer aufgrund der komplexen Fahrdynamik eines einspurigen Fahrzeuges und den umfangreicheren Umweltbelastungen, die auf das MMS einwirken, nicht möglich ist (siehe Unterkapitel 3.2). Dies wurde bereits auch für Motorräder von Guth (2017) postuliert und kann an dieser Stelle bestätigt werden.

Kapitel 4 gibt die Rahmenbedingungen und Prämissen des HMI-Konzeptes wieder. Basierend auf diesen Anforderungen und dem im Unterkapitel 1.2 definierten Ziel dieser Forschungsarbeit ist im Kapitel 5 die Entwicklung und Untersuchung des Konzeptes beschrieben. Die im Rahmen dieser wissenschaftlichen Arbeit durchgeführten Studien lassen sich in zwei Bereiche separieren. Im ersten Abschnitt wurde im Rahmen der Unterkapitel 5.1, 5.2 und 5.3 ein vernetztes System zur Kollisionsverhütung entwickelt und diesbezüglich die Akzeptanz der am Straßenverkehr teilnehmenden Personen untersucht. Im zweiten Abschnitt (Unterkapitel 5.4 und 5.5) wurde, losgelöst von den vorangegangenen

Studien, ein Anzeigekonzept in Form eines Fahrrad-HMI zur Routenführung entwickelt und evaluiert. Zusammengefügt ergeben die Kollisionsverhütungs-Applikation – HMI für die Pkw-Fahrenden – und dem Fahrrad-HMI – optimierte Routenführung – ein HMI-Konzept, bei dem die Verkehrssicherheit aller Verkehrsteilnehmenden profitiert und dem Bedürfnis nach Komfortanzeigen am Fahrrad nachgekommen wird.

In der Motivation (vgl. Unterkapitel 1.1) wurden bereits die Entwicklungsprozesse von zwei heutzutage etablierten Sicherheitssystemen (Dreipunktgurt und eCall) im Kraftfahrzeug erläutert. In beiden Fällen stellte die Akzeptanz durch die Nutzenden eine große Herausforderung dar. Beim Sicherheitsgurt konnte diese durch eine schrittweise Heranführung der Bevölkerung gesteigert werden. Letztendlich war jedoch eine verpflichtende Nutzung mit einer Ahndung bei Missachtung notwendig, damit dieses System angenommen wird (Deutsches Patent- und Markenamt, 2019). Bezogen auf diese wissenschaftliche Arbeit, weist die Entwicklung des eCall Systems deutlich mehr Parallelen auf. Dabei wurde die ursprüngliche Idee des eCall bereits in den 70-er Jahren gelegt. Bedingt durch die unzureichenden technischen Möglichkeiten war dieser Ansatz nicht erfolgreich (Emser, 1981). Erst einige Jahre später konnte mit einem flächendeckenden Mobilfunknetz und einem satellitengestützten Ortungssystem ein Notrufwarnsystem basierend auf einem Smartphone und einem separaten Bewegungssensor für die 12-V Steckdose entwickelt werden (Suliak, 2016). Durch die hohe Wirksamkeit verpflichtete die EU die Automobilbauer, dieses System in die Fahrzeugelektronik zu integrieren.

Beide Beispiele zeigen exemplarisch, dass die Einführung von Sicherheitsmechanismen nicht immer direkt von der Bevölkerung positiv aufgenommen wird und dass es diesbezüglich mehrere Berührungskontakte und Anwendungserfahrungen bedarf. Dies bestätigen auch die im Kapitel 5 aufgeführten Studien. Die Befragten erkennen die Notwendigkeit und den Nutzen aus sicherheitsrelevanten Systemen, bevorzugen aber Systeme, die ihrem Komfort dienlicher sind. Die Steigerung der Akzeptanz und somit auch das Nutzen von sicherheitsrelevanten Maßnahmen kann durch die vordergründige Bereitstellung eines anderen Anwendungszweckes – Befriedigung des Komfortbedürfnisses – erhöht werden. Beispielsweise wird dies bei der Ermittlung der Verkehrsdichte schon über die Routenführung so gehandhabt. Nutzende bekommen die optimale Route zu ihrem gewünschten

Zielort inklusive der allgemeinen Verkehrslage angezeigt. Im Gegenzug stellen die Nutzenden ihre eigenen Positionsdaten dem Anbieter zur Verfügung. Wichtig für den Erfolg solcher Systeme ist, dass die Nutzenden nicht über die weiterführende Verwendung ihrer Daten getäuscht werden (Beggiato & Krems, 2013; Hartwich et al., 2019). Zur Erreichung der größtmöglichen Wirksamkeit ist die Integration von Sicherheitsmaßnahmen in andere – bestehende – Systeme zu empfehlen. Dies zeigt auch die historische Entwicklung von bestehenden Sicherheitsmechanismen (Sicherheitsgurt und eCall). Zukünftig sollte der Ansatz zur Kollisionsverhütung durch die Integration in die bestehenden HMIs der Pkws mit der Darstellung im HUD – im Sinne von Götze (2018) – verfolgt werden. Durch einen Verzicht auf das visuelle Tracken des Fahrradfahrenden in der Kartenansicht des Pkws – nur noch Aufzeigen des potenziellen Gefahrenorts – kann der subjektiv wahrgenommene Datenschutz des Fahrradfahrenden zusätzlich erhöht werden. Schließlich führt dies auch zu einer gesteigerten Akzeptanz. Ein weiterer positiver Aspekt dabei ist, dass die Übersichtlichkeit der Ansicht profitiert. In den Studien wurde bisher ein Eins-zu-Eins Szenario untersucht. In der Realität sind deutlich mehr Fahrrad- und Autofahrende unterwegs, womit die Kartenansicht schnell unübersichtlich werden kann. Gerade dieser Aspekt sollte zukünftig eingehender untersucht werden.

Die Möglichkeiten der Übermittlung von Warnungen oder Hinweisen von einem System an die fahradfahrenden Personen wurde im Rahmen der Arbeit mehrfach erörtert. Für den Abschnitt der Kollisionsverhütung wurde bewusst auf eine Anzeige für die Fahrradfahrenden verzichtet bzw. als Prämisse definiert. Im Unterkapitel 3.3.4 sind die Chancen und Risiken einer optischen Warnung am Lenker des Fahrrades ausführlich dargestellt (vgl. Prati et al., 2018). Diesbezüglich wurde bei der Entwicklung des Fahrrad-HMI eine Routenführungsansicht – in erster Linie Komfortansicht – entwickelt. Dabei ist aus den Daten der Okklusionsstudie zu entnehmen, dass in einer Sekunde (98,6 % vgl. Abbildung 5.18) die abgefragten Informationen sicher und zuverlässig abgelesen werden können. Etwas geringer fällt die Antwortgenauigkeit bei der Anzeigedauer von 750 ms aus. Erst bei einer Präsentationszeit von 500 ms ist eine deutlich erkennbare Abstufung zu erkennen. Ebenfalls offenbart diese Präsentationszeit auch Unterschiede zwischen den beiden Systemen. Das entwickelte Fahrrad-HMI weist gegenüber dem Referenzsystem eine signifikant bessere

Ablesbarkeit bei der Distanz zum nächsten Richtungswechsel und der voraussichtlichen Zielankunftszeit auf (vgl. Linienplots im Anhang D.2.2).

In Anlehnung an die Definition zur maximalen Blickabwendungszeit von zwei Sekunden aus der NHTSA (2013) ist die Anzeigedauer von 750 ms mit einer Erfolgsquote der Probanden von über 95 % als äquivalent anzusehen. Daraus kann geschlussfolgert werden, dass zur Ermittlung einer maximalen Blickabwendungszeit beim Fahrradfahren die Anzeigedauer von 750 ms einen ersten Referenzwert darstellt. Zur Definition eines universellen Grenzwertes vergleichbar der zwei Sekunden aus der NHTSA (2013) sind weiterführende Studien im Labor und im Feld notwendig.

Basierend auf den erhobenen Messdaten der Okklusionsstudie kann diskutiert werden, bis wann eine Warnung der Fahrradfahrenden sinnvoll wäre. Dieses Zeitbudget entspräche dann einem minimalen Zeitfenster, welches zwischen dem Ausführen und dem voraussichtlichen Eintreten einer Gefahrensituation vorhanden sein müsste, damit eine optische Warnung an die fahrradfahrende Person übermittelt werden würde. Kritisch zu hinterfragen ist, ob die erhobenen Daten der Okklusionsstudie ausreichen für einen solchen Rückschluss. Da die Studie, wie von der Methode vorgesehen, unter Laborbedingungen stattfand, wurde ein großer Teil der äußeren Einflüsse – keine Blendungen, keine Vibrationen und kein umgebender Verkehr – kontrolliert oder eliminiert. Im Unterkapitel 3.2 wurde außerdem auf die Wichtigkeit der Beachtung der Fahrdynamik hingewiesen. Dieser Aspekt fand in dem Versuchsaufbau ebenfalls keine Beachtung. Basierend auf den hier erhobenen Daten ist es somit nicht möglich, eine Empfehlung für die zeitliche Gestaltung – minimales Zeitbudget – einer visuellen Warnung oder eines warnenden Hinweises auf dem Smartphone zu geben. Da sich im Bereich des Pkws Warnungen möglichst nah an der Sehachse zum Straßenverkehr – HUD – bewährt haben (vgl. Götze, 2018; Miličić, 2010; Schmidt, 1988), könnte eine abstrakte Warnung über LEDs, verbaut im Helm, ein geringes Ablenkungspotenzial beinhalten (Volvo, 2014). Der große Nachteil dieses Ansatzes ist jedoch, dass die Nutzenden einen neuen Fahrradhelm benötigen und dieser dann auch getragen werden müsste.

Getrieben durch den Verkehrswandel im urbanen Umfeld und dem gesteigerten Umweltbewusstsein der Bevölkerung wird die Nutzung des Fahrrades in den nächsten Jahren weiterhin an Beliebtheit gewinnen. Damit unausweichlich verbunden ist auch ein größer

werdender Stellenwert des Fahrrades im urbanen Straßenverkehr. Die Herausforderung der Sicherstellung der Verkehrssicherheit aller Teilnehmenden wird weiterhin ein relevantes Forschungsthema bleiben. Nur durch eine vielseitigere Herangehensweise mit unterschiedlichen zusammenwirkenden Lösungskonstrukten kann diese Herausforderung bewältigt werden. Dabei wird sich die Verkehrsinfrastruktur der Städte anpassen müssen, ebenso wie die verschiedenen Sicherheitssysteme in den unterschiedlichen Fahrzeugen einen Beitrag dazu leisten werden. Ein Aspekt dabei sind vernetzte und digitale Anwendungen, wie das hier entwickelte HMI-Konzept. Die dazu durchgeführten Studien zeigen auf, dass mit der vorhandenen technischen Ausstattung innerhalb unserer Gesellschaft die technische Umsetzbarkeit einer vernetzten Kollisionsverhütungssaplikation möglich ist. Weiterführend zeigte sich, dass die geäußerten Bedenken hinsichtlich des Datenschutzes dem Bedürfnis nach Komfort untergeordnet werden. Die Akzeptanz steigert sich durch einen direkten Kontakt mit dem System und das Erleben des Nutzens. Zudem sollte der Trend der zunehmenden Elektrifizierung des Fahrrades als Chance zur Steigerung der Verkehrssicherheit angesehen werden. Somit können Verkehrssicherheitssysteme aus dem Pkw-Segment transferiert und adaptiert werden – vgl. Fahrrad-ABS (Maier, 2018). Dazu bietet der Funktions- und Anzeigebereich der Bordcomputer von Pedelecs sehr großes Potenzial. Dieser kann von einem Fahrzeugsteuerungselement hin zu einem der allgemeinen Verkehrssicherheit beitragenden System weiterentwickelt werden. In diesem Zusammenhang wird auch das Dilemma des Warnens ein zu untersuchender Aspekt sein. Die Studie zum Methodentransfer (vgl. Unterkapitel 5.5) offenbarte dazu, dass zum jetzigen Zeitpunkt keine eindeutige Vorwarnzeit definiert werden kann. Vergleichend zu den internationalen Richtlinien der NHTSA (2013) und EN ISO 15005 konnte für weiterführende Untersuchungen ein Referenzwert von 750 ms als maximale Blickabwendungszeit identifiziert werden. Dieser sollte als Ausgangspunkt für die Erstellung von internationalen Richtlinien zur Gestaltung von HMIs – vergleichbar derer für Kraftfahrzeuge – im Zweiradsektor herangezogen werden.

Literaturverzeichnis

- AAM. (2006). Statement of Principles, Criteria and Verification Procedures on Driver Interactions with Advanced InVehicle Information and Communication Systems. *Alliance of automotive manufacturers*.
- Adell, E. (2009). *Driver experience and acceptance of driver support systems - a case of speed adaptation* (Dissertation). Lunds Universität, Schweden.
- Ahlstrom, C., Kircher, K., Thorslund, B. & Adell, E. (2016). Bicyclists' visual strategies when conducting self-paced vs. system-paced smartphone tasks in traffic. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 41, 204–216. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2015.01.010>
- Aloudat, A., Michael, K., Chen, X. & Al-Debei, M. M. (2014). Social acceptance of location-based mobile government services for emergency management. *Telematics and Informatics*, 31(1), 153–171. <https://doi.org/10.1016/j.tele.2013.02.002>
- Bandmann, C., Hammer, T., Potten, H. & Winkler, F. (2019). *Evaluation von Fahrradnavigationssystemen und Konzeption eines benutzungsfreundlichen Fahrradnavigationssystems nach DIN EN ISO 9241-210* (Interdisziplinäres Projekt). Technische Universität München.
- Bangor, A., Kortum, P. & Miller, J. (2009). Determining what individual SUS scores mean: Adding an adjective rating scale. *Journal of Usability Studies*, 4(3), 114–123. <https://doi.org/66.39.39.113>
- Baumann, M., Keinath, A., Krems, J. F. & Bengler, K. (2004). Evaluation of in-vehicle HMI using occlusion techniques: Experimental results and practical implications. *Applied Ergonomics*, 35(3), 197–205. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2003.11.011>
- Beggiato, M. & Krems, J. F. (2013). The evolution of mental model, trust and acceptance of adaptive cruise control in relation to initial information. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 18, 47–57. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2012.12.006>
- Behrens, R., Kleine-Besten, T., Pochmuller, W. & Engelsberg, A. (2015). Digitale Karten im Navigation Data Standard Format. In H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz & C. Singer (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme: Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort* (3. Auflage). Springer Vieweg, Wiesbaden.
- Bengler, K. (2014). Driver Distraction. In D. Crolla, D. E. Foster, T. Kobayashi & N. Vaughan (Hrsg.), *Encyclopedia of Automotive Engineering*. Wiley-Blackwell. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-381984-0.10020-7>
- Bengler, K., Drucke, J., Hoffmann, S., Manstetten, D. & Neukum, A. (2018). *UR:BAN Human Factors in Traffic*. Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-15418-9>
- Bengler, K., Haller, R. & Zimmer, A. (1994). Experimental optimization of route guidance information using context information. *Towards an intelligent transport system :*

- proceedings of the First World Congress on Applications of Transport Telematics and Intelligent Vehicle-Highway Systems.*
- Brooke, J. (1996). SUS: A 'quick and dirty' usability scale. In P. W. Jordan, B. Thomas, I. L. McClelland & B. A. Weerdmeester (Hrsg.), *Usability Evaluation in Industry* (S. 189–194). CRC Press.
- Bubb, H., Bengler, K., Grünen, R. E. & Vollrath, M. (2015). *Automobilergonomie*. Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-8348-2297-0>
- Bubb, H., Bengler, K., Lange, C., Aringer, C., Trübswetter, N., Conti, A. & Zimmermann, M. (2015). Messmethoden. *Automobilergonomie* (S. 617–662). Springer Fachmedien Wiesbaden. https://doi.org/10.1007/978-3-8348-2297-0_11
- Burnett, G. E. (1998). *"Turn right at the King's Head" Drivers' requirements for route guidance information* (Dissertation). Loughborough University. <https://dspace.lboro.ac.uk/dspace-jspui/handle/2134/27347>
- Chapple, C. (2020). Pokémon GO Has Best Year Ever in 2019, Catching Nearly \$900 Million in Player Spending. <https://sensortower.com/blog/pokemon-go-has-best-year-ever-in-2019-catching-nearly-900m-usd-in-player-spending>
- Cohen, J. (1988). *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences* (Bd. 2). Lawrence Erlbaum Associates.
- Conti-Kufner, A. S. (2017). *Measuring cognitive task load : An Evaluation of the Detection Response Task and its implications for driver distraction assessment* (Dissertation). Technische Universität München. <http://mediatum.ub.tum.de?id=1340561>
- Council of European Union. (2016). Verordnung (EU) 2016/679 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 27. April 2016 zum Schutz natürlicher Personen bei der Verarbeitung personenbezogener Daten, zum freien Datenverkehr und zur Aufhebung der Richtlinie 95/46/EG (Datenschutz-Grundverordn.
- Dallmeyer, J. (2014). *Simulation des Straßenverkehrs in der Großstadt*. Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-05207-2>
- Davis, F. D. (1986). *A technology acceptance model for empirically testing new end-user information systems: Theory and results* (Dissertation). Massachusetts Institute of Technology. <http://hdl.handle.net/1721.1/15192>
- Davis, F. D. (1993). User acceptance of information technology: system characteristics, user perceptions and behavioral impacts. *International Journal of Man-Machine Studies*, 38(3), 475–487. <https://doi.org/10.1006/imms.1993.1022>
- Demmel, S. (2015). Using Smartphones for Cycling Safety : A Survey of Riders Preferences and Interest in New Technologies. In I. Cameron, N. Haworth & L. McIntosh (Hrsg.), *Proceedings of the 2015 Australasian Road Safety Conference (ARSC2015)* (S. 1–13). <https://eprints.qut.edu.au/89259/>
- Deutsches Patent- und Markenamt. (2019). 60 Jahre Dreipunktgurt. Verfügbar 25. Juli 2019 unter <https://www.dpma.de/dpma/veroeffentlichungen/meilensteine/60jahredreipunktegurt/index.html>
- de Waard, D., Edlinger, K. & Brookhuis, K. (2011). Effects of listening to music, and of using a handheld and handsfree telephone on cycling behaviour. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 14(6), 626–637. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2011.07.001>

- de Waard, D., Lewis-Evans, B., Jelijs, B., Tucha, O. & Brookhuis, K. (2014). The effects of operating a touch screen smartphone and other common activities performed while bicycling on cycling behaviour. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 22, 196–206. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2013.12.003>
- de Waard, D., Schepers, P., Ormel, W. & Brookhuis, K. (2010). Mobile phone use while cycling: Incidence and effects on behaviour and safety. *Ergonomics*, 53(1), 30–42. <https://doi.org/10.1080/00140130903381180>
- de Waard, D., Westerhuis, F., Joling, D., Weiland, S., Stadtbäumer, R. & Kaltofen, L. (2017). Visual map and instruction-based bicycle navigation: A comparison of effects on behaviour. *Ergonomics*, 60(9), 1283–1296. <https://doi.org/10.1080/00140139.2017.1282628>
- de Waard, D., Westerhuis, F. & Lewis-Evans, B. (2015). More screen operation than calling: The results of observing cyclists' behaviour while using mobile phones. *Accident Analysis and Prevention*, 76, 42–48. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2015.01.004>
- Dialynas, G., Happee, R. & Schwab, A. L. (2019). Design and hardware selection for a bicycle simulator. *Mechanical Sciences*, 10(1), 1–10. <https://doi.org/10.5194/ms-10-1-2019>
- DIN EN ISO 15008. (2017). Straßenfahrzeuge – Ergonomische Aspekte von Fahrerinformations- und Assistenzsystemen – Anforderungen und Bewertungsmethoden der visuellen Informationsdarstellung im Fahrzeug (ISO 15008:2017).
- DIN EN ISO 17287. (2003). Straßenfahrzeuge - Ergonomische Aspekte von Fahrerinformations- und Assistenzsystemen - Verfahren zur Bewertung der Gebrauchstauglichkeit beim Führen eines Kraftfahrzeugs (ISO 17287:2003). <https://doi.org/https://dx.doi.org/10.31030/9474113>
- DIN EN ISO 9241-11. (2018). Ergonomie der Mensch-System-Interaktion – Teil 11: Gebrauchstauglichkeit: Begriffe und Konzepte. <https://doi.org/10.1007/s00738-009-0685-2>
- DIN EN ISO 9241-110. (2008). Ergonomie der Mensch-System-Interaktion – Teil 110: Grundsätze der Dialoggestaltung.
- Doyle, A. J. R. (1987). The skill of bicycle riding.
- Dozza, M., Bianchi Piccinini, G. F. & Werneke, J. (2015). Using naturalistic data to assess e-cyclist behavior. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 41(May), 217–226. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2015.04.003>
- Dozza, M. & Fernandez, A. (2014). Understanding bicycle dynamics and cyclist behavior from naturalistic field data (November 2012). *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 15(1), 376–384. <https://doi.org/10.1109/TITS.2013.2279687>
- Dozza, M. & Werneke, J. (2014). Introducing naturalistic cycling data: What factors influence bicyclists' safety in the real world? *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 24, 83–91. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2014.04.001>
- Drews, J. (2018). *Digitalisierung von Zweirädern* (Bachelor Thesis). Technische Universität München.
- Eisenberger, D. (2019). Zahlen – Daten – Fakten zum Deutschen E-Bike-Markt 2018 E-Bike-Verkäufe erreichen Rekordniveau. Verfügbar 17. April 2019 unter <https://www.ziv-zweirad.de/marktdaten/>

- Eisenberger, D. (2020). *Zahlen – Daten – Fakten zum Deutschen Fahrrad- und E-Bike Markt 2019: Dynamischer Wachstumskurs der Fahrradindustrie setzt sich ungebremst fort* (Techn. Ber.). Berlin. <https://www.ziv-zweirad.de/marktdaten/>
- Eliseenkov, P. (2019). *Akzeptanz von Smartphone-basierter Verkehrssicherheit für Fahrradfahrer* (Master Thesis). Technische Universität München.
- Elvik, R. (2009). *The handbook of road safety measures* (2. ed.). Emerald.
- Emser, J. (1981). Autonotfunk - nichttechnische Begleitforschung. *Projektgruppenberichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Bereich Unfallforschung, 10*, 141.
- EN ISO 15005. (2002). *Straßenfahrzeuge – Ergonomische Aspekte von Fahrerinformations- und -assistenzsystemen – Grundsätze und Prüfverfahren des Dialogmanagements*. <https://www.iso.org/standard/34085.html>
- Engström, J., Victor, T. & Markkula, G. (2013). Attention selection and multitasking in everyday driving: A conceptual model. In M. A. Regan, J. D. Lee & V. T. W. (Hrsg.), *Driver Distraction and Inattention: Advances in Research and Countermeasures* (1. Aufl., S. 27–54). Ashgate Publishing.
- Erke, A. (2018). Fußgänger- und Radfahrersicherheit: Übersicht über den norwegischen und internationalen Forschungsstand. *Zeitschrift für Verkehrssicherheit, 4*, 171–176.
- ESoP. (2008). Commission recommendation of 26 May 2008 on safe and efficient in-vehicle information and communication systems: update of the European Statement of Principles on human-machine interface (2008/653/EC). *Official Journal of the European Union*.
- Esser, H. (1991). Die Erklärung systematischer Fehler in Interviews: Befragtenverhalten als rational choice. In R. Wittenberg (Hrsg.), *Person - Situation - Institution - Kultur: Günter Büschges zum 65. Geburtstag* (S. 59–78). Duncker und Humbolt.
- European Transport Safety Council. (2012). Have a safe ride! A manual for cyclists. <https://etsc.eu/have-a-safe-ride-a-manual-for-cyclists/>
- Fecher, N. & Hoffmann, J. (2015). Fahrerwarnelemente. In H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz & C. Singer (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme: Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort* (3. Auflage, S. 676–685). Springer Fachmedien Wiesbaden. https://doi.org/10.1007/978-3-658-05734-3_37
- Field, A. (2009). *Discovering Statistics Using SPSS* (third edit).
- Frank, A. (2018). *Entwicklung von Konzepten eines Ampel- und Abbiegeassistenten als mobile Anwendung im Fahrzeug* (Master Thesis). Technische Universität München.
- Fuchs, H., Hofmann, F., Löhr, H. & Schaaf, G. (2015). Car-2-X. In H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz & C. Singer (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme: Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort* (3. Auflage, S. 526–540). Springer Fachmedien Wiesbaden. https://doi.org/10.1007/978-3-658-05734-3_28
- Gasser, T. M., Seeck, A. & Smith, B. W. (2015). Rahmenbedingungen für die Fahrerassistenzentwicklung. In H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz & C. Singer (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme: Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort* (3. Auflage). Springer Vieweg, Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-05734-3>
- Girden, E. (1992). *ANOVA: Repeated Measures*. SAGE Publications, Inc. <https://doi.org/10.4135/9781412983419>

- Goldenbeld, C., Houtenbos, M., Ehlers, E. & De Waard, D. (2012). The use and risk of portable electronic devices while cycling among different age groups. *Journal of Safety Research*, 43(1), 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2011.08.007>
- Goldstein, E. B. (2008). *Wahrnehmungspsychologie* (7. Aufl. []). Spektrum, Akad Verl..
- Götze, M. (2018). *Entwicklung und Evaluation eines integrativen MMI Gesamtkonzeptes zur Handlungsunterstützung für den urbanen Verkehr*. Dissertation, Technische Universität München. (Dissertation). Technische Universität München.
- Götze, M., Conti, A. S., Keinath, A., Said, T. & Bengler, K. (2013). Evaluation of a new cockpit color concept under mesopic lighting for urban driving. In M. Aaron (Hrsg.), *Design, User Experience, and Usability. Web, Mobile, and Product Design* (S. 359–366). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-39253-5_39
- Gressmann, M. (2002). *Fahrradphysik und Biomechanik - Technik - Formeln - Gesetze* (7. Auflage). Delius Klasing.
- Guth, S. (2017). Absicherungsmethode von Anzeigekonzepten zur Darstellung fahrfremder Informationen mittels eines Motorrad-Fahrsimulators.
- Haag, C. (2018). *Empirischer Vergleich zweier Eye-Tracking-Systeme unter Beachtung der ISO 15007* (Semesterarbeit). Technische Universität München.
- Hartwich, F., Witzlack, C., Beggiato, M. & Krems, J. F. (2019). The first impression counts – A combined driving simulator and test track study on the development of trust and acceptance of highly automated driving. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 65, 522–535. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2018.05.012>
- Hassenzahl, M., Burmester, M. & Koller, F. (2003). AttrakDiff: Ein Fragebogen zur Messung wahrgenommener hedonischer und pragmatischer Qualität. In J. Ziegler & G. Szwillus (Hrsg.), *Mensch & Computer 2003. Interaktion in Bewegung* (S. 187–196). B.G. Teubner.
- Hassenzahl, M., Burmester, M. & Koller, F. (2008). Der User Experience auf der Spur: Zum Einsatz von www.attrakdiff.de. In H. Brau, S. Diefenbach, M. Hassenzahl, F. Koller, M. Peissner & K. Röse (Hrsg.), *Usability Professionals* (S. 78–82). <http://attrakdiff.de/science.html>
- Hommen, M. (2019). Studie: Tempo in Großstädten sinkt. Verfügbar 16. April 2020 unter <https://www.adac.de/der-adac/aktuelles/studie-verkehrsfluss-in-staedten/>
- Huemer, A. K., Gercek, S. & Vollrath, M. (2019). Secondary task engagement in German cyclists – An observational study. *Safety Science*, 120(July), 290–298. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.07.016>
- Huemer, A. K., Schumacher, M., Mennecke, M. & Vollrath, M. (2018). Systematic review of observational studies on secondary task engagement while driving. *Accident Analysis and Prevention*, 119(December 2017), 225–236. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2018.07.017>
- Hummel, T. & Lang, A. (2016). Typtische Unfälle zwischen Pkw und Radfahrern. *GDV Unfallforschung der Vereicherer - Unfallforschung kompakt*, (55). <https://trid.trb.org/View/1403759>
- Hutcheson, G. & Sofroniou, N. (1999). *The Multivariate Social Scientist*. SAGE Publications, Ltd. <https://doi.org/10.4135/9780857028075>
- ISO 15007. (2015). Road Vehicles - Measurement Of Driver Visual Behaviour With Respect To Transport Information And Control Systems.

- ISO 16673. (2007). Road vehicles — Ergonomic aspects of transport information and control systems — Occlusion method to assess visual demand due to the use of in-vehicle systems.
- ISO/FDIS 9241-210. (2019). Ergonomie der Mensch-System-Interaktion – Teil 210: Prozess zur Gestaltung gebrauchstauglicher interaktiver Systeme. <https://doi.org/https://dx.doi.org/10.31030/3042776>
- Ivanova, M., Bronowicka, J., Kocher, E. & Degner, A. (2018). Foodora and Deliveroo: The App as a Boss? Control and autonomy in app-based management - the case of food delivery riders. *Forschungsförderung Working Paper*, 107, 51.
- JAMA. (2004). Guideline for In-vehicle Display Systems - Version 3.0.
- Jin, W.-l., Kwan, C., Sun, Z., Yang, H. & Gan, Q. (2012). SPIVC: A SmartPhone-based Inter-Vehicle Communication System. *Transportation Research Board 91st Annual Meeting*.
- Jurczok, F. & Borgstedt, S. (2018). *Fahrradmonitor 2017 Zusammenfassung der regionalen Aufstocker-Berichte* (Techn. Ber.). SINUS Markt-und Sozialforschung GmbH.
- Kabell, M. (2016). *Copenhagen City of Cyclists - The Bicycle Account 2016* (Techn. Ber.). Kopenhagen. <http://www.cycling-embassy.dk/wp-content/uploads/2015/05/Copenhagens-Bicycle-Account-2014.pdf>
- Kaiser, H. F. (1960). The Application of Electronic Computers to Factor Analysis. *Educational and Psychological Measurement*, 20(1), 141–151. <https://doi.org/10.1177/001316446002000116>
- Kathmann, T., Scotti, C., Huemer, A. K., Mennecke, M. & Vollrath, M. (2019). *Konzept für eine regelmäßige Erhebung der Nutzungshäufigkeit von Smartphones bei Konzept für eine regelmäßige Erhebung der Nutzungshäufigkeit von Smartphones bei Pkw-Fahrern* (Techn. Ber.). Bundesanstalt für Straßenwesen.
- Keler, A., Kath, J., Chucholowski, F., Chucholowski, M., Grigoropoulos, G., Spangler, M., Kath, H. & Busch, F. (2018). A bicycle simulator for experiencing microscopic traffic flow simulation in urban environments. *21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, 3020–3023. <https://doi.org/10.1109/ITSC.2018.8569576>
- Khanh, T. Q. & Huhn, W. (2015). Sichtverbesserungssysteme. In H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz & C. Singer (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme: Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort* (3. Auflage, S. 816). Springer Fachmedien Wiesbaden. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-658-05734-3_44
- Klanner, F. & Ruhhammer, C. (2015). Backendsysteme zur Erweiterung der Wahrnehmungsreichweite von Fahrerassistenzsystemen. In H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz & C. Singer (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme: Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort* (3. Auflage, S. 542–552). Springer Fachmedien Wiesbaden. https://doi.org/10.1007/978-3-658-05734-3_29
- Klasen, D. & Edenhofer, A. (2020). Deutsche Post und DHL Paket kündigen neue digitale Services zur Qualitätsverbesserung an. <https://www.dpdhl.com/de/presse/pressemitteilungen/2020/deutsche-post-und-dhl-paket-kuendigen-neue-digitale-services-zur-qualitaetsverbesserung-an.html>

- Kleine-Besten, T., Kersken, U., Pöchmüller, W., Schepers, H., Mlasko, T., Behrens, R. & Engelsberg, A. (2015). Navigation und Verkehrstelematik Thomas. In H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz & C. Singer (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme: Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort* (3. Auflage, S. 1048–1080). Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Knoll, P. (2015). Anzeigen für Fahrerassistenzsysteme. In H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz & C. Singer (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme: Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort* (3. Auflage, S. 660–673). Springer Fachmedien Wiesbaden. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-658-05734-3_36
- Kuhn, H. (n.d.). Heijmans Bikescout - Helps cyclists cross safely. Verfügbar 18. März 2020 unter <https://www.heijmans.nl/en/bikescout/>
- Kühn, M. & Hannawald, L. (2015). Verkehrssicherheit und Potenziale von Fahrerassistenzsystemen. In H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz & C. Singer (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme: Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort* (3. Auflage, S. 56–70). Springer Fachmedien Wiesbaden. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-658-05734-3_4
- Kuhnimhof, C., Follmer, T. & Bäumer, R. (2019). Mobilität in Deutschland – Zeitreihenbericht 2002 – 2008 – 2017. *Studie von infas, DLR, IVT und infas 360 im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur*. www.mobilitaet-in-deutschland.de
- Kulmala, R. (2010). Ex-ante assessment of the safety effects of intelligent transport systems. *Accident Analysis and Prevention*, 42(4), 1359–1369. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2010.03.001>
- Lewis, C. & Wharton, C. (1997). Cognitive Walkthroughs. In M. Helander, T. Landauer & P. Prabhu (Hrsg.), *Handbook of Human-Computer Interaction* (2. Aufl., S. 717–732). Elsevier Science.
- Lewis, J. R. (2002). Psychometric Evaluation of the PSSUQ Using Data from Five Years of Usability Studies. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 14(3-4), 463–488. <https://doi.org/10.1080/10447318.2002.9669130>
- Liebner, M. & Klanner, F. (2015). Fahrerabsichtserkennung und Risikobewertung. In H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz & C. Singer (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme: Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort* (3. Auflage, S. 701–720). Springer Fachmedien Wiesbaden. https://doi.org/10.1007/978-3-658-05734-3_39
- Liebner, M., Klanner, F. & Stiller, C. (2013). Active safety for vulnerable road users based on smartphone position data. *IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Proceedings*, (4), 256–261. <https://doi.org/10.1109/IVS.2013.6629479>
- Lipovac, K., Đerić, M., Tešić, M., Andrić, Z. & Marić, B. (2017). Mobile phone use while driving-literary review. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 47, 132–142. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2017.04.015>
- Maier, O. (2018). *Modellbasierte Entwicklung eines aktiven Sicherheitssystems für elektrifizierte Fahrräder* (Dissertation). KIT Scientific Publishing, Karlsruhe. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.5445/KSP/1000081286>

- Miličić, N. (2010). *Sichere und ergonomische Nutzung von Head-Up Displays im Fahrzeug* (Dissertation). Technische Universität München. <http://mediatum.ub.tum.de/?id=817137>
- Monsell, S. (2003). Task switching. *Trends in Cognitive Sciences*, 7(3), 134–140. [https://doi.org/10.1016/S1364-6613\(03\)00028-7](https://doi.org/10.1016/S1364-6613(03)00028-7)
- Moosbrugger, H. & Kelava, A. (2008). Deskriptivstatistische Evaluation von Items (Itemanalyse) und Testwertverteilungen. In H. Moosbrugger & A. Kelava (Hrsg.), *Testtheorie und Fragebogenkonstruktion* (S. 73–98). Springer Medizin Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-540-71635-8_4
- Mwakalonge, J. L., White, J. & Siuhi, S. (2014). Distracted Biking: A Review of the Current State-of-Knowledge. *International Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 3(2), 42–51. <https://doi.org/10.5923/j.ijtte.20140302.02>
- Neukum, A. & Krüger, H. P. (2003). Fahrerreaktionen bei Lenksystemstörungen - Untersuchungsmethodik und Bewertungskriterien. *VDI Berichte*, (1791), 297–318.
- Neukum, A., Lübbecke, T., Krüger, H.-P., Mayser, C. & Steinle, J. (2008). ACC-Stop & Go: Fahrerverhalten an funktionalen Systemgrenzen. In M. Maurer & C. Stiller (Hrsg.), *5. Workshop Fahrerassistenzsysteme - FAS 2008* (S. 141–150).
- NHTSA. (2013). Visual-manual NHTSA driver distraction guidelines for in-vehicle electronic devices. *Washington, DC: National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA), Department of Transportation (DOT)*, 78(81).
- Nielsen, J. (1994a). Enhancing the explanatory power of usability heuristics. *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems celebrating interdependence - CHI '94*, 33(3), 152–158. <https://doi.org/10.1145/191666.191729>
- Nielsen, J. (1994b). Heuristic evaluation. In J. Nielsen & R. L. Mack (Hrsg.), *Usability Inspection Methods*. John Wiley & Sons, New York.
- Nobis, C. (2019). *Mobilität in Deutschland – Mid Analysen zum Radverkehr und Fußverkehr* (Techn. Ber.). Studie von infas, DLR, IVT und infas 360 im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (FE-Nr. 70.904/15. Bonn, Berlin. www.mobilitaet-in-deutschland.de
- Nobis, C. & Kuhnimhof, C. (2019). *Mobilität in Deutschland – MiD Ergebnisbericht* (Techn. Ber.). Studie von infas, DLR, IVT und infas 36 im Auftrag des Bundesministers für Verkehr und digitale Infrastruktur (FE-Nr. 70.904/15). www.mobilitaet-in-deutschland.de
- Nygårdhs, S., Ahlström, C., Ihlström, J. & Kircher, K. (2018). Bicyclists' adaptation strategies when interacting with text messages in urban environments. *Cognition, Technology and Work*, 20(3), 377–388. <https://doi.org/10.1007/s10111-018-0478-y>
- Osswald, S., Wurhofer, D., Trösterer, S., Beck, E. & Tscheligi, M. (2012). Predicting information technology usage in the car. *Proceedings of the 4th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications - AutomotiveUI '12*. <https://doi.org/10.1145/2390256.2390264>
- Petermann-Stock, I. & Rhede, J. (2013). Intelligente Strategien fuer nutzerzentrierte MMI Konzepte im urbanen Raum. *Der Fahrer im 21. Jahrhundert. Fahrer, Fahrerunterstuetzung und Bedienbarkeit. 7. Tagung der VDI-Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik*, (2205).

- Polizeipräsidium München. (2019). Verkehrsbericht 2018. Verfügbar 7. August 2019 unter <https://www.polizei.bayern.de>
- Powell, J., Stroh, O. & Thomas, G. W. (2018). Hardware Design for an Electro-Mechanical Bicycle Simulator in an Immersive Virtual Reality Environment. *International Journal of Virtual Reality*, 18(2), 1–18. <https://doi.org/10.20870/ijvr.2018.18.2.2903>
- Prati, G., Puchades, V. M., De Angelis, M., Pietrantoni, L., Fraboni, F., Decarli, N., Guerra, A. & Dardari, D. (2018). Evaluation of user behavior and acceptance of an on-bike system. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 58, 145–155. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2018.06.005>
- Ranney, T., Garrott, W. & Goodman, M. (2001). NHTSA driver distraction research: past, present, and future. <http://www-nrd.nhtsa.dot.gov/pdf/esv/esv17/proceed/00177.pdf>
- Rasmussen, J. (1983). Skills, Rules, and Knowledge; Signals, Signs, and Symbols, and Other Distinctions in Human Performance Models. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, SMC-13(3), 257–266. <https://doi.org/10.1109/TSMC.1983.6313160>
- Regan, M. A., Hallett, C. & Gordon, C. P. (2011). Driver distraction and driver inattention: Definition, relationship and taxonomy. *Accident Analysis & Prevention*, 43(5), 1771–1781. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2011.04.008>
- Regan, M. A., Horberry, T. & Stevens, A. (2014). *Driver Acceptance of New Technology: Theory, Measurement and Optimisation*. Ashgate publishing limited. <https://doi.org/10.1201/9781315578132>
- Richter, M. & Flückiger, M. D. (2016). *Usability und UX kompakt* (M. Richter & M. D. Flückiger, Hrsg.; 4. Auflage). Springer Vieweg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-49828-6_3
- Rudlof, C. (2006). *Handbuch Software-Ergonomie* (2. Auflage). Unfallkasse Post und Telekom.
- Sarodnick, F. & Brau, H. (2015). *Methoden der Usability Evaluation: Wissenschaftliche Grundlagen und praktische Anwendung* (3. Auflage). Hogrefe AG, Bern.
- Schacter, D. L. & Buckner, R. L. (1998). Priming and the Brain Review. *Cell*, 20(2), 185–195. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0896-6273\(00\)80448-1](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0896-6273(00)80448-1)
- Schambeck, S. (2018). *Evaluierung des visuellen Ablenkungspotenzials zweier User Interface Konzepte eines Ampelassistenten im Fahrsimulator anhand einer Blickanalyse* (Master Thesis). Technische Universität München.
- Schleinitz, K., Petzoldt, T., Franke-Bartholdt, L., Krems, J. & Gehlert, T. (2017). The German Naturalistic Cycling Study – Comparing cycling speed of riders of different e-bikes and conventional bicycles. *Safety Science*, 92, 290–297. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2015.07.027>
- Schmidt, R. A. (1988). *Motor control and learning: A behavioral emphasis* (2. Aufl.).
- Schnieder, E. & Schnieder, L. (2013). *Verkehrssicherheit*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-71033-2>
- Schwab, A. L. & Meijaard, J. P. (2013). A review on bicycle dynamics and rider control. *Vehicle System Dynamics*, 51(7), 1059–1090. <https://doi.org/10.1080/00423114.2013.793365>
- Silla, A., Leden, L., Rämä, P., Scholliers, J., Noort, M. V. & Bell, D. (2017). Can cyclist safety be improved with intelligent transport systems ? *Accident Analysis and Prevention*, 105, 134–145. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2016.05.003>

- Sokoll, C. & Herrmann, A. (2020). Was den Deutschen ihre Daten wert sind und wem sie sie anvertrauen. Verfügbar 6. November 2020 unter <http://www.ici.unisg.ch/de/was-den-deutschen-ihre-daten-wert/>
- Solbeck, C. (2017). *Evaluation eines 3D-Audio-Displays zur Steigerung des Raumbewusstseins von Piloten* (Master Thesis). Technische Universität München.
- Statistisches Bundesamt. (2019a). Ausstattung mit Gebrauchsgütern. Verfügbar 12. Juli 2019 unter <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Einkommen-Konsum-Lebensbedingungen/Ausstattung-Gebrauchsgueter/Tabellen/liste-infotechnik-d.html>
- Statistisches Bundesamt. (2019b). Ausstattung privater Haushalte mit ausgewählten Gebrauchsgütern. *Fachserie 15: Wirtschaftsrechnungen*.
- Statistisches Bundesamt. (2019c). *Verkehr - Verkehrsunfälle* (Techn. Ber. Nr. 7).
- Statistisches Bundesamt. (2020). *Verkehr - Verkehrsunfälle – Dezember 2019* (Techn. Ber.).
- Stavrinos, D., Pope, C. N., Shen, J. & Schwebel, D. C. (2018). Distracted Walking, Bicycling, and Driving: Systematic Review and Meta-Analysis of Mobile Technology and Youth Crash Risk. *Child Development*, 89(1), 118–128. <https://doi.org/10.1111/cdev.12827>
- Stelling-Konczak, A., Vlakveld, W. P., van Gent, P., Commandeur, J. J., van Wee, B. & Hagenzieker, M. (2018). A study in real traffic examining glance behaviour of teenage cyclists when listening to music: Results and ethical considerations. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 55, 47–57. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2018.02.031>
- Stork, B., Kohls, A., Stephanie, K. & Koopmann, L. (2018). ADFC-Positionspapier: Geschützte Radfahrstreifen. <https://www.adfc.de/pressemitteilung/adfc-erklaert-protected-bike-lanes/>
- Strauss, J. (2015). *New Methods for Modeling and Integrating Bicycle Activity and Injury Risk in an Urban Road Network* (Dissertation). McGill University, Montreal.
- Strayer, D. L., Cooper, J. M., Turrill, J., Coleman, J., Medeiros-Ward, N. & Biondi, F. (2013). Measuring cognitive distraction in the Automobile. *AAA Foundation for Traffic Safety*. <http://trid.trb.org/view.aspx?id=1252566>
- Streeter, A. (2007). RFID Lights Up The Blind Spot. Verfügbar 4. März 2019 unter <https://www.treehugger.com/bikes/rfid-lights-up-the-blind-spot.html>
- Suliak, H. (2016). Versicherer starten automatisches Notruf-System für Autos. <https://www.gdv.de/resource/blob/9386/aff064d34a8b768afd436103094c67a1/pressemitteilung--1882506186-data.pdf>
- Surges, F. (2019). Fabian Surges. www.bast.de
- TAPCO. (2019). Pedestrian crosswalk solutions. <https://www.tapconet.com/product/in-road-warning-light-system>
- Telefónica Germany. (n. d.). So bewegt sich Deutschland. Verfügbar 19. März 2020 unter <https://www.telefonica.de/analytics/anonymisierte-daten/studie-so-bewegt-sich-deutschland.html>
- Terzano, K. (2013). Bicycling safety and distracted behavior in the Hague, the Netherlands. *Accident Analysis and Prevention*, 57, 87–90. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2013.04.007>
- Thielen, D., Lorenz, T., Hannibal, M., Köster, F. & Plättner, J. (2012). A feasibility study on a cooperative safety application for cyclists crossing intersections. *IEEE Conference*

- on *Intelligent Transportation Systems, Proceedings, ITSC*, 1197–1204. <https://doi.org/10.1109/ITSC.2012.6338601>
- Tivesten, E. & Dozza, M. (2014). Driving context and visual-manual phone tasks influence glance behavior in naturalistic driving. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 26(PA), 258–272. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2014.08.004>
- Tondera, M., Hera, C. & Eliseenkov, P. (2018). *Akzeptanz und Realisierung eines Smartphone-basierten Ansatzes zur Steigerung der Verkehrssicherheit von Fahrradfahrern* (Interdisziplinäres Projekt). Technische Universität München.
- Tullis, T. & Albert, B. (2013). *Measuring the User Experience: Collecting, Analyzing, and Presenting Usability Metrics* (Second Edi). Elsevier / Morgan Kaufmann. <https://doi.org/10.1016/C2011-0-00016-9>
- Vansteenkiste, P., Zeuwts, L., Cardon, G., Philippaerts, R. & Lenoir, M. (2014). The implications of low quality bicycle paths on gaze behavior of cyclists: A field test. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 23, 81–87. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2013.12.019>
- Vansteenkiste, P., Zeuwts, L., van Maarseveen, M., Cardon, G., Savelsbergh, G. & Lenoir, M. (2017). The implications of low quality bicycle paths on the gaze behaviour of young learner cyclists. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 48(October 2018), 52–60. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2017.04.013>
- Venkatesh, V., Morris, M. G., Davis, G. B. & Davis, F. D. (2003). User Acceptance of Information Technology: Toward a Unified View. *MIS Quarterly*, 27(3), 425–478. <https://doi.org/10.2307/30036540>
- Vollrath, M. (2015). *Ingenieurpsychologie: Psychologische Grundlagen und Anwendungsgebiete*. Kohlhammer Verlag. <http://repositorio.unan.edu.ni/2986/1/5624.pdf>
- Vollrath, M., Huemer, A. K., Nowak, P., Pion, O. & Hummel, T. (2015). *Ablenkung durch Informations- und Kommunikationssysteme* (26. Aufl.). GDV Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft.
- Volvo. (2014). *Volvo Cars, POC and Ericsson demonstrate cloud-based wearable cycling tech concept* (Techn. Ber.). <https://www.media.volvocars.com/global/en-gb/print/155565>
- von Below, A. (2016). *Verkehrssicherheit von Radfahrern – Analyse sicherheitsrelevanter Motive, Einstellungen und Verhaltensweisen* (Techn. Ber.). Bundesanstalt für Straßenwesen. Bergisch Gladbach, Germany.
- Vrček, N., Bubaš, G. & Bosilj, N. (2008). User Acceptance of Location-based Services. *International Journal of Humanities and Social Sciences*, 2(5), 482–487. <https://doi.org/doi.org/10.5281/zenodo.1332102>
- Wandtner, B., Schumacher, M. & Schmidt, E. A. (2016). The role of self-regulation in the context of driver distraction: A simulator study. *Traffic Injury Prevention*, 17(5), 472–479. <https://doi.org/10.1080/15389588.2015.1102231>
- Wickens, C. D. (1984). Processing Resources in Attention. In R. Parasuraman & D. R. Davies (Hrsg.), *Varieties of attention* (S. 63–102). Academic Press.
- Wickens, C. D., Hollands, J. G., Banbury, S. & Parasuraman, R. (2016). *Engineering Psychology and Human Performance* (4. Aufl.). Psychology Press.

- Winkler, F. (2020). *Evaluierung zweier Fahrradnavigationssysteme – Eine Suitability- und Usability-Untersuchung unter Laborbedingungen* (Master Thesis). Technische Universität München.
- Winkler, S., Powelleit, M., Kazazi, J., Vollrath, M., Krautter, W., Korthauer, A., Drüke, J., Töpfer, D., Semmler, C. & Bendewald, L. (2018). HMI Strategy – Warnings and Interventions. In K. Bengler, J. Drüke, S. Hoffmann, D. Manstetten & A. Neukum (Hrsg.), *UR:BAN Human Factors in Traffic* (S. 75–103). Springer Fachmedien Wiesbaden. https://doi.org/10.1007/978-3-658-15418-9_5
- Winner, H., Hakuli, S., Lotz, F. & Singer, C. (2015). *Handbuch Fahrerassistenzsysteme: Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort* (3. Auflage). Springer Vieweg, Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-05734-3>
- Winzer, O. M., Conti, A. S., Olaverri-Monreal, C. & Bengler, K. (2017). Modifications of Driver Attention Post-distraction: A Detection Response Task Study. In F. F.-H. Nah & C.-H. Tan (Hrsg.), *HCI in Business, Government and Organizations. Interacting with Information Systems* (S. 400–410). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-58481-2_31
- Winzer, O. M., Conti-Kufner, A. S. & Bengler, K. (2018). Intersection Traffic Light Assistant - An Evaluation of the Suitability of two Human Machine Interfaces. *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Proceedings, ITSC, 2018*, 261–265. <https://doi.org/10.1109/ITSC.2018.8569708>
- Winzer, O. M., Conti-Kufner, A. S., Bengler, K., Walter, M. & Müller, S. (2017). It's still there: Why driver distraction won't be going away anytime soon. *Ergonomie Aktuell - Die Fachzeitschrift des Lehrstuhls für Ergonomie*, 18, 35–37. <https://www.mw.tum.de/lfe/downloads/>
- Winzer, O. M., Dietrich, A., Tondera, M., Hera, C., Eliseenkov, P. & Bengler, K. (2020). Feasibility Analysis and Investigation of the User Acceptance of a Preventive Information System to Increase the Road Safety of Cyclists. In T. Ahram, W. Karwowski, S. Pickl & R. Taiar (Hrsg.), *Human Systems Engineering and Design II* (S. 236–242). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-27928-8_36
- Wolfe, E. S., Arabian, S. S., Breeze, J. L. & Salzler, M. J. (2016). Distracted biking: An observational study. *Journal of Trauma Nursing*, 23(2), 65–70. <https://doi.org/10.1097/JTN.0000000000000188>
- XCYCLE. (2016). *D 2.1 – Present State of Affairs* (Techn. Ber.). EU-Projekt. <https://site.unibo.it/xcycle/en/deliverables>
- Young, R. A. (2015). Driver Compensation: Impairment or Improvement? *Human Factors*, 57(8), 1334–1338. <https://doi.org/10.1177/0018720815585053>
- Zajonc, R. B. (1968). Attitudinal Effects of Mere Exposure. *Journal of Personality and Social Psychology*, 9(2 PART 2), 1–27. <https://doi.org/10.1037/h0025848>

Abkürzungsverzeichnis

ABS	Antiblockiersystem
AGB	Allgemeine Geschäftsbedingungen
BASt	Bundesanstalt für Straßenwesen
BI	Bewertungsindex
BMVI	Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur
CTAM	Car Technology Acceptance Model
EU	Europäischen Union
GPS	Global Positioning System
HMI	Human-Machine-Interface
HUD	Head-Up Display
ID	Identifikationsnummer
IVIS	In-Vehicle-Infotainment-System
KMO	Kaiser-Meyer-Olkin
Lkw	Lastkraftwagen
LSA	Lichtsignalanlage
MMS	Mensch-Maschine-System
NDS	Naturalistic Driving Study
ÖPNV	öffentlicher Personennahverkehr
Pkw	Personenkraftwagen
PSSUQ	Post-Study-System-Usability-Questionnaire
SUS	System Usability Scale
TAM	Technology Acceptance Model
TICS	Verkehrsinformations- und -regelsysteme
TTC	Time-to-Collision
UCDP	User Centered Design Prozess
UTAUT	Unified Theory of Acceptance and Use of Technology
VRU	Vulnerable Road User
UX	User Experience
V2X	Vehicle-to-X

Publikationen

Im Rahmen des Dissertationsvorhabens sind die nachfolgenden aufgeführten Publikationen entstanden:

Winzer, O. M., Conti, A. S., Olaverri-Monreal, C. & Bengler, K. (2017). Modifications of Driver Attention Post-distraction: A Detection Response Task Study. In F. F.-H. Nah & C.-H. Tan (Hrsg.), *HCI in Business, Government and Organizations. Interacting with Information Systems* (S. 400–410). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-58481-2_31.

Winzer, O. M., Conti-Kufner, A. S., Bengler, K., Walter, M. & Müller, S. (2017). It's still there: Why driver distraction won't be going away anytime soon. *Ergonomie Aktuell - Die Fachzeitschrift des Lehrstuhls für Ergonomie*, 18, 35–37. <https://www.mw.tum.de/lfe/downloads/>.

Winzer, O. M., Conti-Kufner, A. S. & Bengler, K. (2018). Intersection Traffic Light Assistant - An Evaluation of the Suitability of two Human Machine Interfaces. *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Proceedings, ITSC, 2018*, 261–265. <https://doi.org/10.1109/ITSC.2018.8569708>.

Winzer, O. M., Dietrich, A., Tondera, M., Hera, C., Eliseenkov, P. & Bengler, K. (2020). Feasibility Analysis and Investigation of the User Acceptance of a Preventive Information System to Increase the Road Safety of Cyclists. In T. Ahram, W. Karwowski, S. Pickl & R. Tajar (Hrsg.), *Human Systems Engineering and Design II* (S. 236–242). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-27928-8_36.

A Anhang – Ergänzende Unterlagen zu der Untersuchung in Kapitel 5.1

Die in diesem Abschnitt dargestellten Informationen dienen dem besseren Verständnis und der Nachvollziehbarkeit der im Abschnitt 5.1 dargestellten Studie. Die Daten wurden im Rahmen einer Studienarbeit von Tondera et al. (2018) erhoben.

A.1 Fragebogen nach Tondera et al. (2018)

Steigerung der Sicherheit von Fahrradfahrern im Straßenverkehr durch Car-2-X Kommunikation²⁷

Herzlich Willkommen,

und vielen Dank, dass Sie an der Befragung teilnehmen. Diese wird etwa 10 Minuten dauern. Ihre Angaben werden strikt anonym und ausschließlich für den Zweck dieser Studie verwendet.

Radfahrer sind im deutschen Straßenverkehr durch motorisierte Verkehrsteilnehmer stark gefährdet. Der häufigste Unfallgegner – der Pkw (79,8 %) – ist auch in den meisten Fällen der Unfallverursacher (75,4 %). (Statistisches Bundesamt [Destatis], 2015)

Dies haben wir, eine studentische Projektgruppe am Lehrstuhl für Ergonomie (TUM), zum Anlass genommen, mittels der folgenden Befragung Abhilfemöglichkeiten zu identifizieren. Wir befragen Sie zunächst als Fahrradfahrer und danach auch als Handy-Nutzer. Wir möchten damit Ihre Erfahrungen bei der Problemlösung berücksichtigen.

²⁷ Der in diesem Abschnitt präsentierte Fragebogen weicht aus Gründen der besseren Lesbarkeit in seiner Darstellung von dem tatsächlichen online Fragebogen von Tondera et al. (2018) ab. Die Informationen (Texte und Abbildungen) sind jedoch deckungsgleich.

Teil A: Fahrradnutzung

A1 Wie erreichen Sie überwiegend Ihre Arbeitsstelle / Ausbildungsort:

- Auto Motorrad Fahrrad ÖPNV zu Fuß andere:

A2 Besitzen Sie ein Fahrrad?

- Ja Nein

A3 Sind Sie Kunde bei einem Fahrradverleih / Anbieter von Bike-Sharing?

- Ja Nein

A4 Für was nutzen Sie ein Fahrrad vorwiegend?

- Arbeitsweg im Beruf Einkaufen Sport
 zur Zerstreuung anderes:

A5 Wie oft nutzen Sie das Fahrrad in der Fahrradsaison?

- täglich
 mehrmals wöchentlich
 mehrmals monatlich
 mehrmals jährlich
 nie

A6 Nutzen Sie einen Fahrradcomputer?

- Ja Nein

A7 Gibt es an Ihrem Fahrrad eine Handyhalterung?

- Ja Nein

A8 Hatten Sie in den vergangenen 5 Jahren einen Fahrradunfall mit einem motorisierten Verkehrsteilnehmer?

- Ja Nein

Teil B: Handynutzung

B1 Besitzen Sie ein Handy?

- Ja Nein

B2 Nennen Sie jetzt bitte Modell und Betriebssystem Ihres Handys:

Modell:

Betriebssystem:

B3 Was ist der Hauptgrund dafür, wenn Sie ein Handy benutzen:

- Freizeit Beruf/Studium

B4 Seit wie viel Jahren benutzen Sie schon Handys?

B5 Wie viele Handys hatten Sie in diesem Zeitraum?

B6 Welche Handyfunktion nutzen Sie beim Fahrradfahren am häufigsten?

- keine Telefon Text Messenger Musik E-Mail
 Navigation Andere:

B7 Ist Ihr Handy ein Smartphone?

- Ja Nein

B8 Wie benutzen Sie die Ortungsdienste?

- Ortungsdienste sind immer aktiviert
 Ortungsdienste sind immer deaktiviert
 Ortungsdienste schalte ich nur bei Gebrauch jeweiliger Applikationen an
 Weiß ich nicht/Interessiert mich nicht

B9 Welche drei Apps benutzen Sie am häufigsten?

Nennen Sie die am häufigsten benutzte App bitte zuerst.

App 1:

App 2:

App 3:

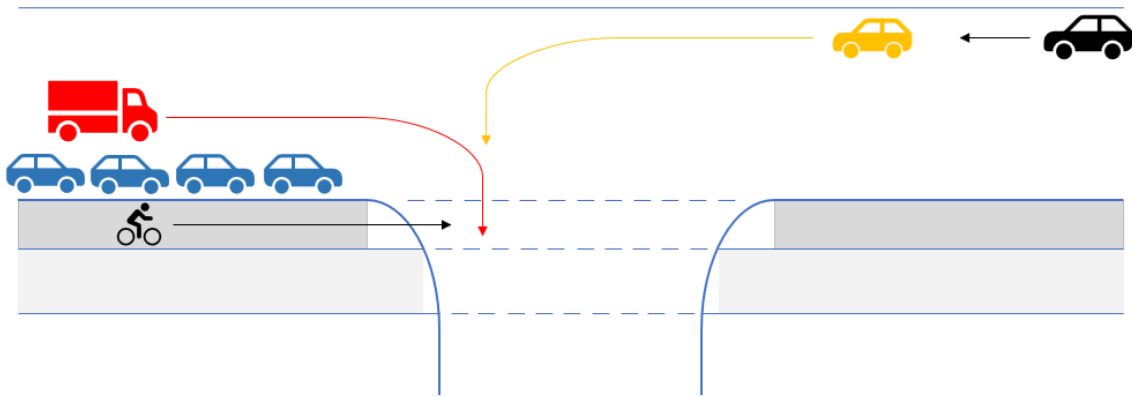
B10 Welche Social Media Plattformen nutzen Sie? Das schließt auch die Nutzung am Tablet, PC oder Mac mit ein.

- Facebook Instagram Twitter Tumblr Pinterest
 Snapchat LinkedIn Xing Ich nutze keine Andere:

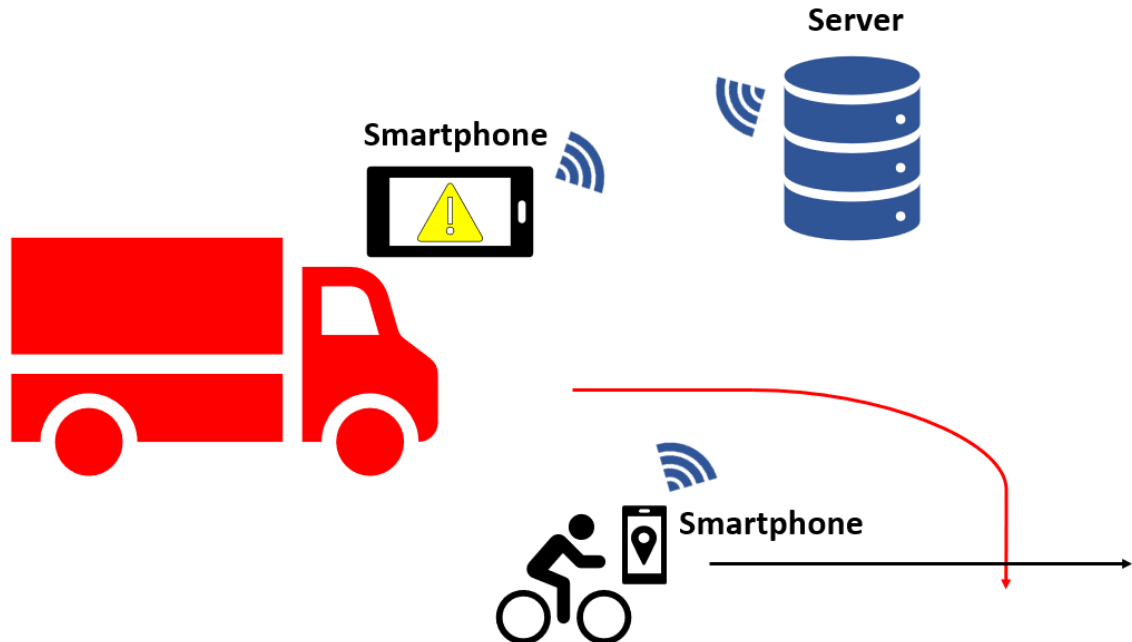
Teil C: Projekt

Eine der viel diskutierten Möglichkeiten, den Straßenverkehr sicherer zu machen, besteht darin, bei Kollisionsgefahr mit einem Fahrradfahrer (oder Fußgänger) den motorisierten

Verkehrsteilnehmer zu warnen. Dies könnte über eine Smartphone-App ermöglicht werden, die automatisch per Funk die Position seines Trägers an einen Server sendet. Dort werden die Standortdaten mit anderen Verkehrsteilnehmern in einem gewissen Radius verglichen. Besteht Kollisionsgefahr, so geht eine Warnung an die motorisierten Verkehrsteilnehmer.



In dem obigen Beispiel ist der Fahrradfahrer aufgrund der parkenden Autos (blau) verdeckt. Für den abbiegenden LKW (rot) und das abbiegende Auto (gelb) ist der Radler nur schwer zu erkennen. Das ist eine gefährliche Situation.



Der Radler wird auf dem Navigationsgerät der motorisierten Verkehrsteilnehmer angezeigt und ist so trotz Sichtverdeckung leicht zu erkennen. Begibt sich der Autofahrer dennoch auf

Kollisionskurs, wird er per Kollisionsalarm gewarnt.

C1 Bitte versuchen Sie nun, sich in den Radfahrer hineinzusetzen, der sein Handy mit einer solchen App ausgerüstet hat. Hierzu bitten wir Sie um Ihre Antworten:

	stimme gar nicht zu	stimme nicht zu	stimme eher nicht zu	neutral	stimme eher zu	stimme zu	stimme stark zu
Ich habe Bedenken gegen- über einer App, die meine Standortdaten mit anderen Verkehrsteilnehmern teilt.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ich würde die hier geplante App selber benutzen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Wenn ich dadurch Prämien einsparen kann, habe ich nichts dagegen, wenn mein Versicherer Daten über meine Radnutzung erhält.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ich würde es begrüßen, wenn Verkehrsteilnehmer künftig gesetzlich verpflichtet sind, an der Car-to-X Kommunikation mit Kollisions- alarm teilzunehmen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Eine App zum Fahrradfahren zu benutzen, wäre für mich zu viel Aufwand.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ich glaube an einen tatsäch- lichen Nutzen für die Sicherheit durch diese Idee.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

C2 Gerne möchten wir von Ihnen erfahren, wie Sie über diesen Handy-Einsatz zur Unfall-
verhütung denken. Warum würden Sie so eine App vielleicht nutzen – andernfalls: warum
eher nicht? Bitte erläutern Sie Ihre Antwort.

C3 Welche Bedenken, sofern vorhanden, haben Sie grundsätzlich gegen das Teilen Ihrer Standortdaten. Bitte erläutern Sie Ihre Antwort.

Teil D: Demographische Daten

Zum Ende bitten wir Sie noch um ein paar demografische Angaben:

D1 Sind Sie Student*in?

- Ja Nein

D2 Bitte geben Sie hier Ihr Geschlecht an:

- weiblich männlich

D3 Bitte geben Sie hier Ihr Alter an:

A.2 Daten und Ergebnisse

In diesem Abschnitt sind die ausführlich ausgewerteten Versuchsdaten der im Unterkapitel 5.1 präsentierten Studie dargestellt.

Ergebnis zu der Frage A1: „Wie erreichen Sie überwiegend Ihre Arbeitsstelle / Ausbildungsort?“ (N = 153; Ein Proband gab an sein Fahrrad und den ÖPNV gleichermaßen zu verwenden).

	ÖPNV	Pkw	Fahrrad	zu Fuß	Motorrad
Anzahl	63	48	33	10	0
rel. Häufigkeit [%]	40,91	31,17	21,43	6,49	0

Ergebnis zu der Frage A4: „Für was nutzen Sie ein Fahrrad vorwiegend?“ (N = 153). Die Daten sind qualitativ neu bewertet im Vergleich zu Tondera et al. (2018).

Art	Anzahl	rel. Häufigkeit [%]
Freizeit	46	30,07
zur Arbeit	40	26,14
Einkaufen	15	9,80
Alles	6	3,92
keine Nutzung	5	3,27
letzte Meile	4	2,61
Statusobjekt	1	0,65
Sonstiges	1	0,65

Ergebnis zu der Frage A5: „Wie oft nutzen Sie das Fahrrad in der Fahrradsaison?“ (N = 153).

	nie	mehrmals jährlich	mehrmals monatlich	mehrmals wöchentlich	täglich
Anzahl	14	27	31	48	33
rel. Häufigkeit [%]	9,15	17,65	20,26	31,37	21,57

Ergebnisse zu den Fragen der allgemeinen Ausstattung und des Nutzungsverhaltens (A2, A3, A6, A7, A8, B1, B7; N = 153).

Frage	Ja	Nein
Fahrrad Besitz	135	18
rel. Häufigkeit [%]	88,24	11,76
Bike Sharing Kunde	12	141
rel. Häufigkeit [%]	7,84	92,16
Fahrradcomputer Nutzung	12	141
rel. Häufigkeit [%]	7,84	92,16
Smartphonehalterung am Fahrrad	7	146
rel. Häufigkeit [%]	4,58	95,42
Fahrradunfall mit einem motorisierten Verkehrsteilnehmer in den letzten 5 Jahren	9	144
rel. Häufigkeit [%]	5,88	94,12
Smartphone Besitz	150	3*
rel. Häufigkeit [%]	98,04	1,96

* Ein Proband gibt an ein klassisches Handy zu besitzen.

Ergebnis zur Frage B2: „Nennen Sie jetzt bitte Modell und Betriebssystem Ihres Handys“ (N = 153).

	Android	Apple iOS	Sonstiges	Windows	keine Angaben
Anzahl	71	65	5	4	8
rel. Häufigkeit [%]	46,41	42,48	3,27	2,61	5,23

Ergebnis zur Frage B3: „Was ist der Hauptgrund dafür, wenn Sie ein Handy benutzen“ (N = 153).

	Freizeit	Beruflich (Studium)	keine Angaben
Anzahl	129	22	2
rel. Häufigkeit [%]	84,31	14,38	1,31

Ergebnis zu der Frage B6: „Welche Handyfunktion nutzen Sie beim Fahrradfahren am häufigsten?“ (N = 153).

Handyfunktion	Anzahl	rel. Häufigkeit [%]
keine	82	53,59
Musik	33	21,57
Navigation	22	14,38
Text Messenger	7	4,58
Telefon	5	3,27
Browser (Andere)	2	1,31
keine Angabe	2	1,31

Ergebnis zur Frage B8: „Wie benutzen Sie die Ortungsdienste?“ (N = 153).

	Bei Verwendung der App	Immer an	Immer aus	weiß nicht	keine Angabe
Anzahl	90	32	20	8	3
rel. Häufigkeit [%]	58,82	20,92	13,07	5,23	1,96

Ergebnis zu der Frage B9: „Welche drei Apps benutzen Sie am häufigsten?“ (N = 437; mehrfach Nennungen möglich). Die genannten Applikationen sind auf ihre jeweilige Kategorie abstrahiert worden.

Applikationskategorie	Anzahl	rel. Häufigkeit [%]
Text Messenger	144	32,95
Soziale Netzwerke	62	14,19
E-Mail	44	10,07
Browser	34	7,78
Navigation/Karten	27	6,18
Musik	26	5,95
Nachrichten	24	5,49
Spiele	11	2,52
Videos	11	2,52
Wetter	8	1,83
Telefon	7	1,60
ÖPNV	7	1,60
Sonstiges	6	1,37
Banking	4	0,92
Gesundheit	4	0,92
Kalender	4	0,92
Suchmaschine	2	0,46
Dating	2	0,46
Notizen	2	0,46
Kamera	2	0,46
Taschenrechner	2	0,46
Skype	1	0,23
Office	1	0,23
Verkehr	1	0,23
Kontakte	1	0,23

Itemanalyse Die Ergebnisse der Itemanalyse bezogen auf alle 153 Befragten ist der Tabelle 5.2 zu entnehmen. Aus den Kontrollfragen ist zu erkennen, dass neun der Befragten die Systematik der vorgestellten Applikation nicht ausreichend verstanden haben. Daher ist in der nachfolgenden Tabelle die Analyse erneut unter Ausschluss dieser neun Probanden vollzogen worden.

Tabelle A.1: Ergebnisse der Itemanalyse unter Ausschluss der neun Probanden, welche die Systematik der Applikation nicht verstanden haben (N = 144).

Item	Fehlen	Mittelwert	Standardabweichung	Schiefe	Schwierigkeitsindex P	Trennschärfe	α , wenn Item weggelassen
1	0	3,13	1,856	0,577	35,50	0,563	0,775
2	0	3,44	1,835	0,155	40,67	0,797	0,719
3	0	2,69	1,829	0,747	28,17	0,407	0,809
4	0	2,91	1,774	0,474	31,83	0,543	0,779
5	0	3,54	1,939	0,254	42,33	0,510	0,788
6	0	4,18	1,777	-0,353	53,00	0,578	0,772
		3,32	1,307			Cronbach's $\alpha = 0,805$	

B Anhang – Ergänzende Unterlagen zu der Untersuchung in Kapitel 5.3

In diesem Abschnitt sind die Versuchsdaten sowie weiterführende Tabellen, Grafiken und Abbildungen der im Unterkapitel 5.3 beschriebenen Studie dargestellt. Die Daten wurden im Rahmen einer Studienarbeit von Eliseenkov (2019) erhoben.

B.1 Fragebogen nach Eliseenkov (2019)

Verkehrssicherheit von Radfahrern²⁸

Herzlich Willkommen und vielen Dank, dass Sie an der Befragung teilnehmen. Diese findet im Rahmen meiner Masterarbeit am Lehrstuhl für Ergonomie (TU München) statt und dauert etwa 20 - 25 Minuten. Ihre Angaben werden anonym gespeichert, sodass später keine Rückschlüsse auf Ihre Person möglich sind. Ihre Antworten werden vertraulich behandelt und ausschließlich zur wissenschaftlichen Auswertung verwendet.

Im Rahmen dieser Masterarbeit wurde ein System zur Steigerung der Verkehrssicherheit von Fahrradfahrern entwickelt. Es wird von Auto- und Fahrradfahrern per Smartphone bedient. Ziel der Umfrage ist es zu erfahren, wie das System von Benutzern aktuell wahrgenommen wird und wie es in Zukunft verbessert werden kann. Dabei gibt es keine richtigen oder falschen Antworten.

Diese Umfrage enthält auch Videos mit Ton. Deswegen ist es empfehlenswert, die Umfrage daheim am Laptop oder PC/Mac auszufüllen, oder wenigstens ein Tablet zu verwenden.

²⁸ Der in diesem Abschnitt präsentierte Fragebogen weicht aus Gründen der besseren Lesbarkeit in seiner Darstellung von dem tatsächlichen online Fragebogen von Eliseenkov (2019) ab. Die Informationen (Texte und Abbildungen) sind jedoch deckungsgleich.

Nach erfolgreichem Abschluss der Umfrage können Sie an der Verlosung von drei 20 € Gutscheinen von Amazon teilnehmen.

Teil A: Auto ohne System

Sehen Sie sich das folgende Video bitte aufmerksam an.



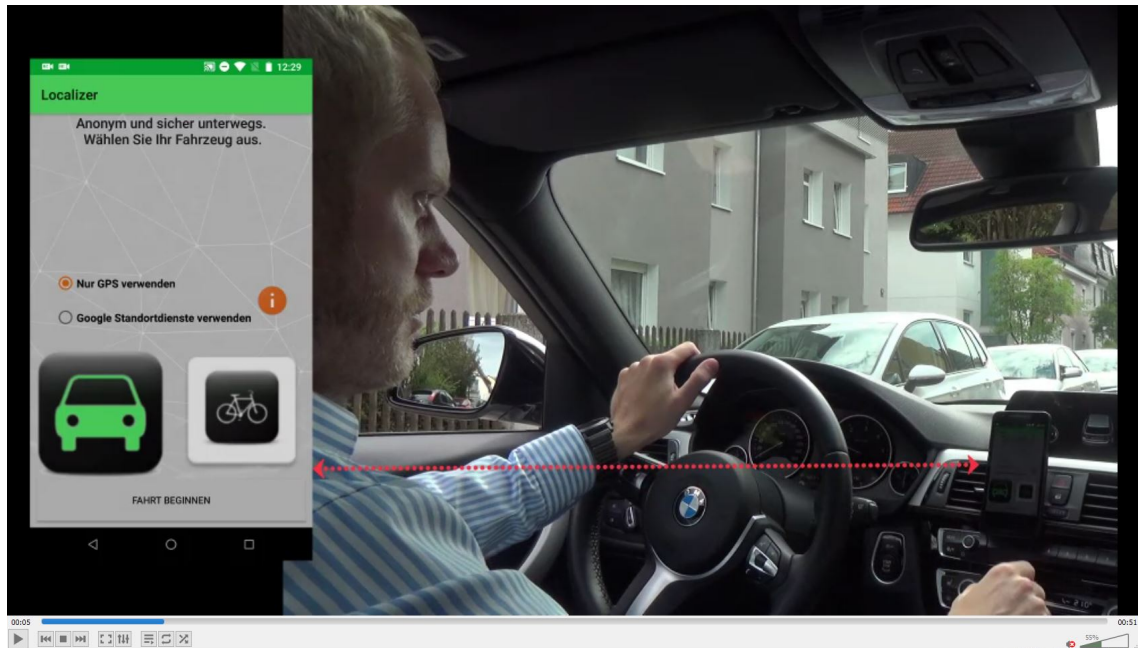
Wie kritisch war die Situation?

Überlegen Sie sich bitte erst die verbale Kategorie und wählen Sie anschließend eine Zahl zur genaueren Einstufung.

nicht kontrollierbar	10
gefährlich	9
	8
	7
unangenehm	6
	5
	4
harmlos	3
	2
	1
nichts bemerkt	0

Teil B: Auto mit System

Sehen Sie sich bitte auch dieses Video aufmerksam an.



Wie kritisch war die Situation?

Überlegen Sie sich bitte erst die verbale Kategorie und wählen Sie anschließend eine Zahl zur genaueren Einstufung.

nicht kontrollierbar	10
gefährlich	9
	8
	7
unangenehm	6
	5
	4
harmlos	3
	2
	1
nichts bemerkt	0

CTAM: Zeitpunkt 1

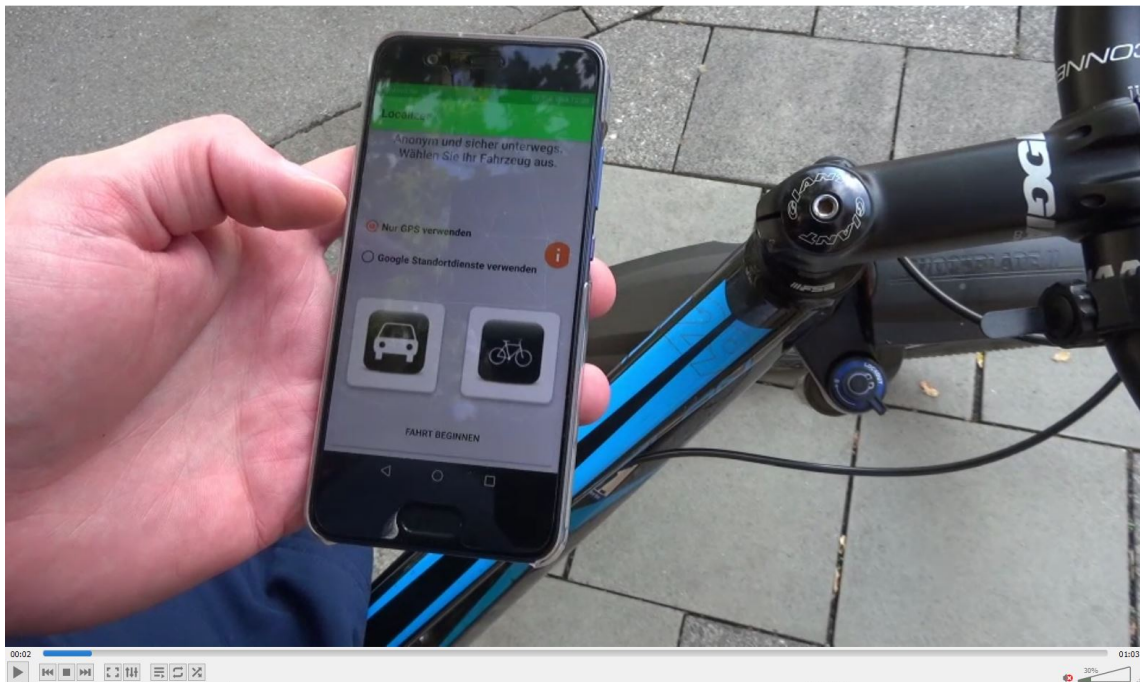
Beantworten Sie bitte alle Fragen im Bezug auf das im zweiten Video gezeigte System.

	starke Ablehnung		neutral			starke Zustimmung	
	1	2	3	4	5	6	7
Das System wäre beim Fahren nützlich.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Items aus Tabelle B.2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Zur qualitativen Absicherung wählen Sie hier bitte starke Zustimmung aus.*	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

*Dieses Item wurde ergänzt (randomisierte Position)

Teil C: Fahrrad mit System

Sehen Sie sich bitte auch dieses Video aufmerksam an.



Hier können Sie einen statischen und nicht vollständigen Prototyp des Systems ausprobieren. Fühlen Sie sich frei ihn zu erkunden und sowohl in die Rolle des Auto- als auch des Fahrradfahrers zu schlüpfen. Wenn Ihnen etwas besonders positiv oder negativ auffällt, können Sie das im unteren Textfeld mitteilen.



Haben Sie sich durch den Prototyp navigiert und sich einen Eindruck von der Benutzeroberfläche verschafft?

- Ja Nein

Hier können Sie Ihre Kommentare zum Prototypen hinterlassen.

User Experience: AttrakDiff 2

Sie haben nun die Verwendung des Systems sowohl aus der Sicht des Autofahrers als auch aus der des Fahrradfahrers gesehen. Sie hatten auch die Möglichkeit, das System ein

wenig selber auszuprobieren. Zudem haben Sie eine Erklärung über die Funktionsweise des Systems erhalten.

Beantworten Sie bitte die folgenden Fragen im Bezug auf ihren aktuellen Gesamteindruck vom System.

harmlos	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	herausfordernd
lahm	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	fesselnd
...	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	...

Verwendet wurde der Fragebogen AttrakDiff 2 von Hassenzahl et al. (2003).

Teil D: Erklärung der Funktionsweise des Systems²⁹

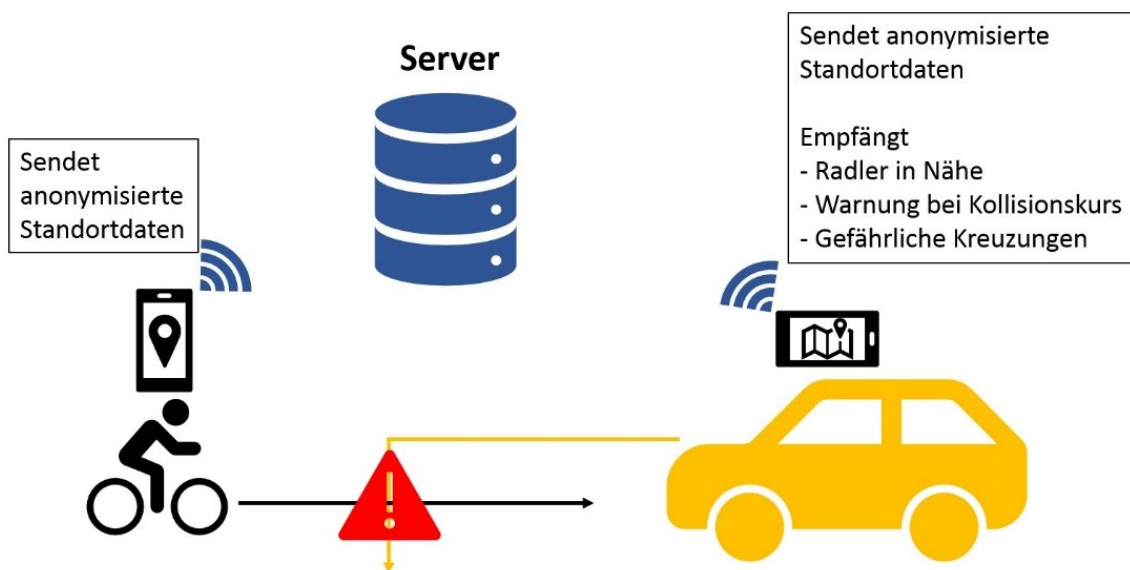
Gruppe 1: kurze Erläuterung

Damit das System funktioniert braucht die App Zugriff auf Ihren Standort.

Haben Sie die Erklärung aufmerksam durchgelesen?

Ja Nein

Gruppe 2: Grafik & kurzer Text



²⁹ Das Probandenkollektiv wird randomisiert in drei Gruppen separiert. Jede dieser Gruppen erhält eine unterschiedlich umfangreiche Erläuterung zu der Funktionsweise des Systems. Anschließend beantwortet jeder Proband den CTAM Fragebogen hinsichtlich der jeweiligen Erläuterung (hier: CTAM 2 genannt).

Alle Teilnehmer senden ihre anonymisierten Standortdaten an einen Server. Dort werden sie hinsichtlich der örtlichen Nähe und möglicher Kollisionen ausgewertet. Diese Informationen bekommt der Autofahrer angezeigt.

Haben Sie die Erklärung aufmerksam durchgelesen?

Ja Nein

Gruppe 3: detaillierte Erläuterung

Mittels eines GPS-Chips, der in den meisten Smartphones eingebaut ist, wird die Position der Verkehrsteilnehmer (Auto- und Radfahrer) auf wenige Meter genau bestimmt. Alle Verkehrsteilnehmer, die das System nutzen, senden ihre aktuelle Position ein Mal pro Sekunde an einen Server. Dort werden die Positionsdaten verarbeitet und mittels trajektorienbasierter Berechnungen auf mögliche Kollisionen hin untersucht. Befindet sich ein Fahrradfahrer in der Nähe, wird dieser dem Autofahrer angezeigt. Droht eine potenzielle Kollision, wird der Autofahrer mit mehreren Sekunden Vorlauf audiovisuell gewarnt (Warnton und Anzeige des berechneten Kollisionspunkts). Damit das System die einzelnen Positionspunkte einem Verkehrsteilnehmer zuordnen kann, wird zu Beginn jeder Fahrt eine randomisierte Nummer (ID) vom Server generiert und dem Teilnehmer zugewiesen. Sobald der Teilnehmer eine Fahrt beendet hat, wird die ID vom System neu vergeben. Die bis dahin erhobenen Positionsdaten werden auf verkehrssicherheitsrelevante Punkte, beispielsweise Kreuzungen mit erhöhter Kollisionsgefahr, hin untersucht und anschließend gelöscht. Längerfristig werden nur kumulierte und pseudonymisierte Daten gespeichert, die keinen Rückschluss auf konkrete Personen und deren Verhalten zulassen und die lediglich der Weiterentwicklung des Systems dienen. Zu den gespeicherten Daten zählen Latenzen (wie schnell das System Daten erhält und verarbeitet), die Art und Genauigkeit der Positionsbestimmung sowie die Fahrtdauer.

Haben Sie die Erklärung aufmerksam durchgelesen?

Ja Nein

CTAM: Zeitpunkt 2

Sie haben nun die Verwendung des Systems sowohl aus der Sicht des Autofahrers als auch aus der des Fahrradfahrers gesehen. Sie hatten auch die Möglichkeit, das System ein wenig selber auszuprobieren. Zudem haben Sie eine Erklärung über die Funktionsweise des Systems erhalten.

Beantworten Sie bitte die folgenden Fragen im Bezug auf ihren aktuellen Gesamteindruck vom System.

	starke Ablehnung		neutral			starke Zustimmung	
	1	2	3	4	5	6	7
Das System wäre beim Fahren nützlich.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Items aus Tabelle B.2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Zur qualitativen Absicherung wählen Sie hier bitte starke Zustimmung aus.*	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

*Dieses Item wurde ergänzt

Teil E: Weitere Aspekte

E1 Das aktuelle System ist eine eigenständige App, die derzeit keinerlei Integration oder Interaktion mit anderen Apps und Diensten bereitstellt. Unabhängig von rechtlichen Aspekten wäre es rein technisch jedoch möglich dies zu realisieren.

Beispiele dafür wären:

- Warnungen für den Autofahrer bei der Navigation (z.B. Google Maps, Navigon) anzeigen
- Mitteilen des Standorts des Radfahrers in Sport-Apps (z.B. Runtastic, Freeletics, Schrittzähler) integrieren

Was ist Ihre Meinung dazu?

- Das System sollte eigenständig bleiben.
- Ich hätte gerne die Wahl, welche Funktionen ich in andere Apps und Dienste integriere.
- Das System sollte komplett in andere Dienste integriert werden.

Bitte begründen Sie Ihre Wahl.

E2 Das aktuelle System ist Smartphone-basiert. Unabhängig von rechtlichen Aspekten wäre es rein technisch jedoch möglich es auch auf anderen Geräten zu nutzen.

Beispiele dafür wären:

- Warnungen für den Autofahrer direkt im Fahrerinformationssystem des Autos anzeigen (z.B. Mittelkonsole, Head-up-Display).
- Mitteilen des Standorts des Radfahrers durch einen GPS-Chip im Fahrrad selbst (z.B. MVG Rad, Call-a-Bike).

Was ist Ihre Meinung dazu?

Die Nutzung des Systems ...

- ...per Smartphone ist für mich in Ordnung.
- ...als integrierter Teil in meinem privaten Auto ist für mich in Ordnung.
- ...als integrierter Teil in einem geliehenen Auto ist für mich in Ordnung.
- ...als integrierter Teil in meinem privaten Fahrrad ist für mich in Ordnung.
- ...als integrierter Teil in einem Leihrad ist für mich in Ordnung.
- ...über Wearables (z.B. Smartwatches, Fitnessstracker) ist für mich in Ordnung.
- Sonstiges:

Bitte begründen Sie Ihre Wahl.

E3 Es wäre technisch möglich, dass die App sich automatisch startet, sobald sie erkennt, dass man Fahrrad fährt. Was ist Ihre Meinung dazu?

- Ja, ich finde es gut, wenn sich die App selber aktiviert und Autofahrer auf mich aufmerksam macht, ohne dass ich sie selbst starten muss.
- Ich hätte in der App gerne die Wahl, ob sie sich selbst aktiviert oder nicht.

- Nein, ich möchte nicht, dass die App ohne mein Handeln aktiv ist.

Bitte begründen Sie Ihre Wahl.

E4 Wie viel wären Sie bereit einmalig für die App zu bezahlen?

0,00 €

0,99 €

1,99 €

3,49 €

4,99 €

7,49 €

9,99 €

14,99 €

Sonstiges:

E5 Ich glaube an einen Sicherheitsgewinn durch das System.

- Ja Nein

Bitte begründen Sie Ihre Wahl.

E6 Es ist aktuell möglich die App kostenlos herunterzuladen und somit das System aktiv zu nutzen. Sind Sie bereit das zu tun?

- Ja Nein

E7 Wie oft lesen Sie die AGB und Datenschutzbestimmungen, wenn Sie eine App installieren oder einen Service im Internet nutzen?

nie

selten

in 50 % der Fälle

- oft
- immer

Was sind die Gründe, warum Sie so mit den AGB und Datenschutzbestimmungen umgehen?

E8 In wie vielen sozialen Netzwerken (z.B. facebook, LinkedIn, Pinterest) sind Sie Mitglied?

- 0
- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- >5

E9 Haben Sie im Zeitraum Dezember 2017 - Januar 2018 an einer ähnlichen Umfrage teilgenommen, in der es auch um Smartphone-basierte Fahrradfahrersicherheit ging?

- Ja
- Nein

Teil F: Demographische Daten

F1 Bitte geben Sie hier Ihr Alter an:

F2 Was ist Ihr höchster Bildungsabschluss?

- kein Schulabschluss
- (qualifizierter) Haupt-/Mittelschulabschluss
- Mittlere Reife
- (Fach-)Abitur
- Bachelor
- Master / Diplom / Magister
- Dr. / PhD
- Prof.

F3 Was ist Ihre derzeitige Hauptbeschäftigung?

- Schüler/in oder Student/in
- Berufstätig (Teil-/Vollzeit oder Selbstständig)
- Rente / Pension
- Sonstiges:

F4 In welchem Stadttyp leben Sie derzeit?

- Landstadt/-gemeinde (weniger als 5.000 Einwohner)
- Kleinstadt (5.000 bis 19.999 Einwohner)
- Mittelstadt (20.000 bis 99.999 Einwohner)
- Großstadt (100.000 bis 499.999 Einwohner)
- große Großstadt (ab 500.000 Einwohner)

F5 Bitte geben Sie Ihr Geschlecht an:

- Männlich
- Weiblich
- Divers
- keine Antwort

F6 Haben Sie Einschränkungen, aufgrund derer Sie das vorgestellte System nicht selbst nutzen können?

- Ja Nein

Teil G: Abschluss der Befragung

Vielen Dank für die Teilnahme und Ihren Beitrag zu meiner Masterarbeit. Fragen und Anregungen können gerne an peter.eliseenkov@tum.de gesendet werden.

Falls Sie Android-Nutzer sind, würde es mir sehr helfen wenn Sie die App im Playstore herunterladen und im Alltag nutzen. Das können Sie per Klick auf den Link oder durch Scannen des QR-Codes machen.³⁰

Wenn Sie an der Verlosung von drei 20€-Gutscheinen von Amazon teilnehmen möchten, tragen Sie bitte hier Ihre E-Mail-Adresse ein.

Alternativ können Sie auch eine E-Mail an peter.eliseenkov@tum.de schicken.

³⁰ Link und QR-Code entfernt, da die App nicht mehr verfügbar ist.

B.2 Methodik

Tabelle B.1: Erläuterung der Bedeutung der Determinanten des CTAM Fragebogens in Tabelle B.2 (Osswald et al., 2012).

Determinanten	Beschreibung
U	perceived usefulness
RA	relative advantage
OE	outcome expectations
EOU	perceived ease of use
EU	ease of use
A	attitude
AF	affect towards use
Affect	affect
SN	subjective norm
SF	social factors
PBC	perceived behavioral control
FC	facilitating conditions
SE	self efficacy
ANX	anxiety
BA	behavioral anxiety
BI	behavioral intention to use technology
PS	perceived safety

Tabelle B.2: CTAM Fragebogen mit den englischsprachigen Items aus dem original Fragebogen und den ins Deutsche übersetzten Items (nach Eliseenkov, 2019; Osswald et al., 2012).

Codierung	Items (englisch)	Items (deutsch)
PE	Performance expectancy	Leistungserwartung
U	The system would be useful while driving.	Das System wäre beim Fahren nützlich.
RA1*	Using the system enables me to accomplish my goals more quickly.	-
RA2*	Using the system increases my driving performance.	-

Codierung	Items (englisch)	Items (deutsch)
OE	If I would use the system I will reach my destination safely.	Wenn ich das System nutzen würde, käme ich sicher an meinem Ziel an.
EE	Effort expectancy	Aufwandserwartung
EOU1	My interaction with the system would be clear and understandable.	Meine Interaktion mit dem System wäre klar und verständlich.
EOU2	It would be easy for me to become skillful at using the system.	Es wäre für mich einfach, gekonnt mit dem System umzugehen.
EOU3	I find the system easy to use.	Ich finde das System ist einfach zu benutzen
EU	Learning how to operate the system is easy for me.	Zu lernen wie man das System bedient, ist einfach für mich.
ATUT	Attitude towards using technology	Einstellung gegenüber Technologie
A	Using the system is a good idea.	Das System zu verwenden ist eine gute Idee.
AF1	The system makes driving more interesting.	Das System macht das Fahren interessanter.
AF2	Interacting with the system would be fun.	Mit dem System zu interagieren würde Spaß machen.
Affect	I would like interacting with the system.	Mir würde es gefallen mit dem System zu interagieren.
SI	Social influence	Sozialer Einfluss
SN1	I would be proud to show the system to people who are close to me.	Ich wäre stolz, das System Menschen zu zeigen, die mir nahe stehen.
SN2	People whose opinions are important to me would like the system too.	Menschen, deren Meinung mir wichtig ist, würden das System auch mögen.
SF1	My passenger(s) would be helpful when using the system.	Mein(e) Mitfahrer wären im Umgang mit dem System hilfreich.

Codierung	Items (englisch)	Items (deutsch)
SF2	In general, people who I like would encourage me to use the system.	Im Allgemeinen würden Menschen, die ich mag, mich ermutigen das System zu verwenden.
Fc	Facilitating conditions	Nutzungsumstände
PBC1	While using the system I can maintain an safely driving behavior.	Während der Nutzung des Systems kann ich ein sicheres Fahrverhalten beibehalten.
PBC2	I have the knowledge necessary to use the system.	Ich habe das notwendige Wissen, um das System zu verwenden.
PBC3	The system is compatible with other systems I use.	Das System ist kompatibel zu anderen Systemen, die ich verwende.
FC	There would be somebody I can ask for assistance with system difficulties.	Es müsste jemanden geben, den ich bei Schwierigkeiten mit dem System um Hilfe fragen kann.
	Self-efficacy	
	I could complete a task or activity using the system..	
SE1*	.. if there was no one around to tell me what to do.	
SE2*	.. if I could call someone for help if I got stuck.	
SE3*	.. if I had a lot of time.	
SE4*	.. if I had just the built-in help facility for assistance.	
Anxiety	Anxiety	Angst
ANX1	I have concerns about using the system.	Ich habe Bedenken hinsichtlich der Nutzung des Systems.
ANX2	I think I could have an accident because of using the system.	Ich glaube, ich könnte wegen der Nutzung des Systems einen Unfall haben.
ANX3	The system is somewhat frightening to me.	Das System macht mir irgendwie Angst.

Codierung	Items (englisch)	Items (deutsch)
BA1	I fear that I do not reach my destination because of the system.	Ich befürchte, ich werde mit dem System mein Ziel nicht erreichen.
BA2**	I am afraid that I do not understand the system.	-
BA3	I am confident that the system does not affect my driving.	Ich bin zuversichtlich, dass das System mein Fahrverhalten nicht beeinflusst.
BI	Behavioural intention to use the system	Nutzungsintention
BI1	Assuming I had access to the system, I intend to use it.	Angenommen, ich hätte Zugang zum System, habe ich vor, es zu nutzen.
BI2	Given that I had access to the system, I predict that I would use.	Vorausgesetzt ich hätte Zugang zum System, prognostiziere ich, dass ich es nutzen würde.
BI3	If the system is available I plan to use the system in the next months. Perceived	Wenn das System verfügbar ist, plane ich es in den nächsten Monaten zu nutzen.
PS	Perceived safety	Wahrgenommene Sicherheit
PS1	I believe that using the system is dangerous.	Ich glaube, das System zu nutzen ist gefährlich.
PS2	Using the system requires increased attention.	Die Nutzung des Systems benötigt gesteigerte Aufmerksamkeit.
PS3	The system distracts me from driving.	Das System lenkt mich vom Fahren ab.
PS4	I feel safe while using the system.	Ich fühle mich sicher, wenn ich das System benutze.
PS5	Using the system decreases the accident risk.	Die Verwendung des Systems senkt das Unfallrisiko.
PS6	I can use the system without looking at it.	Ich kann das System verwenden, ohne darauf zu schauen.

* Auf diese Items wurde verzichtet, da die Anwendbarkeit auf das hiesige System nicht gegeben ist.

Codierung	Items (englisch)	Items (deutsch)
-----------	------------------	-----------------

** Osswald et al. (2012) haben das Item ausgeschlossen, da es einen Einfluss auf die Reliabilität hat.

B.3 Daten und Ergebnisse

B.3.1 Demographische Daten

Ergebnis zu der Frage F2: „Was ist Ihr höchster Bildungsabschluss?“ (N = 143).

Abschluss	Anzahl	rel. Häufigkeit [%]
Master / Diplom / Magister	52	36,36
(Fach-)Abitur	38	26,57
Bachelor	30	20,98
Dr. / PhD	12	8,39
Mittlere Reife	8	5,59
Prof.	1	0,70
(qualifizierter) Haupt-/Mittelschulabschluss	1	0,70
keine Angaben	1	0,70

Ergebnis zu der Frage F3: „Was ist Ihre derzeitige Hauptbeschäftigung?“ (sonstige Nennungen konnten den vorhanden Kategorien zugeordnet werden; N = 143).

Beschäftigung	Anzahl	rel. Häufigkeit [%]
Berufstätig (Teil-/Vollzeit oder Selbstständig)	76	53,15
Schüler/in oder Student/in	61	42,66
Rente / Pension	5	3,50
keine Angaben	1	0,70

Ergebnis zu der Frage F4: „In welchem Stadttyp leben Sie derzeit?“ (N = 143).

Stadttyp	Anzahl	rel. Häufigkeit [%]
große Großstadt (ab 500.000 Einwohner)	60	41,96
Großstadt (100.000 bis 499.999 Einwohner)	38	26,57
Mittelstadt (20.000 bis 99.999 Einwohner)	19	13,29
Landstadt/-gemeinde (weniger als 5.000 Einwohner)	16	11,19
Kleinstadt (5.000 bis 19.999 Einwohner)	9	6,29
keine Angaben	1	0,70

B.3.2 CTAM

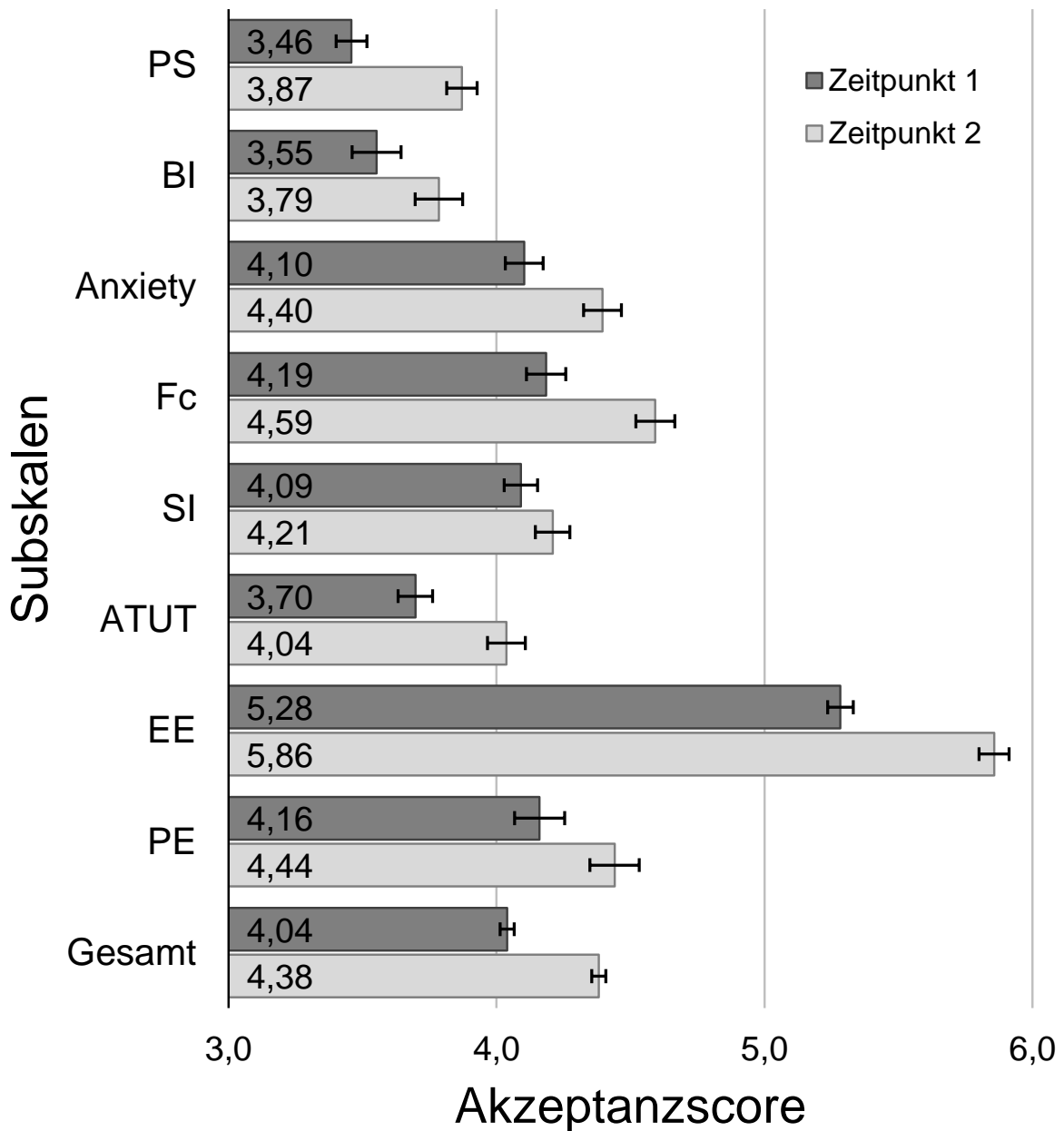


Abbildung B.1: Deskriptive Ergebnisse (Mittelwerte mit Standardfehler) zum CTAM gegliedert nach den Subskalen für beide Erhebungszeitpunkte (N = 143).

B.3.3 AttrakDiff 2

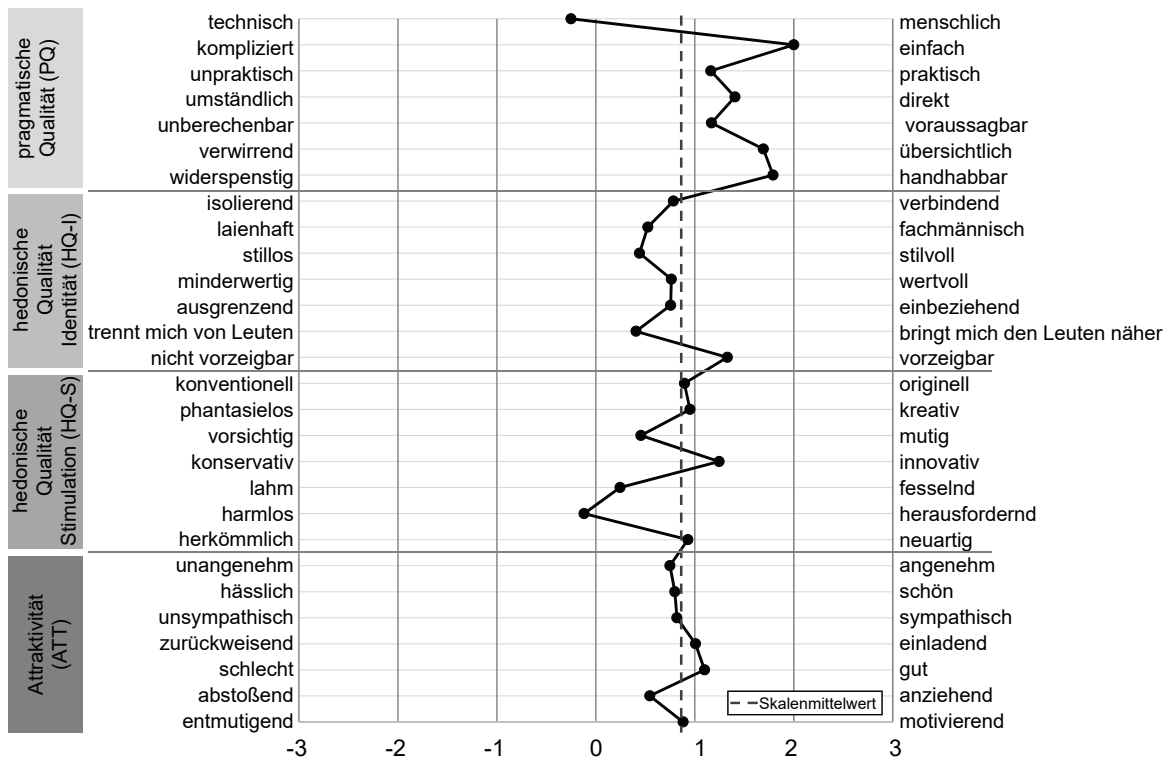


Abbildung B.2: Ergebnis der semantischen Analyse des AttrakDiff 2; gemittelt nach Items und gesamt Wert; geclustert nach den Subskalen (N = 143).

Tabelle B.3: Deskriptives Ergebnis der Subskalen des AttrakDiff (N = 143).

	N	Min	Max	M	SD	Std.-Fehler
PQ	143	-3,00	3,00	1,2807	1,06222	,08883
ATT	143	-3,00	3,00	,8422	1,05928	,08858
HQ-I	143	-3,00	2,71	,7143	1,04250	,08718
HQ-S	143	-2,14	3,00	,6573	,93465	,07816
HQ	143	-2,57	2,57	,6858	,88912	,07435
Σ	143	-2,57	2,57	,8736	,87342	,07304

B.3.4 Weitere Aspekte

Ergebnis zu der Frage E1 zur Integration oder Interaktion mit anderen Apps und Diensten (N = 143).

Integration	Anzahl	rel. Häufigkeit [%]
Ich hätte gerne die Wahl, welche Funktionen ich in andere Apps und Dienste integriere.	83	58,04
Das System sollte komplett in andere Dienste integriert werden.	37	25,87
Das System sollte eigenständig bleiben.	23	16,08

Ergebnis zu der Frage E2: „Die Nutzung des Systems ...“ (Mehrfachnennungen möglich; N = 549).

Systemplattform	Anzahl	rel. Häufigkeit [%]
...per Smartphone ist für mich in Ordnung.	105	19,13
...als integrierter Teil in meinem privaten Auto ist für mich in Ordnung.	94	17,12
...als integrierter Teil in einem geliehenen Auto ist für mich in Ordnung.	99	18,03
...als integrierter Teil in meinem privaten Fahrrad ist für mich in Ordnung.	77	14,03
...als integrierter Teil in einem Leihrad ist für mich in Ordnung.	97	17,67
...über Wearables (z.B. Smartwatches, Fitnesstracker) ist für mich in Ordnung.	77	14,03

Weiterführendes Ergebnis zu der Frage E2 nach der Häufigkeit der Nennungen von einem der Sechs vorgeschlagenen Systemintegrationen (N = 143).

Anzahl von Nennungen	Häufigkeit	rel. Häufigkeit [%]
6 / 6	41	28,67
5 / 6	24	16,78
4 / 6	24	16,78
3 / 6	17	11,89
2 / 6	10	6,99
1 / 6	16	11,19
0 / 6	11	7,69

Ergebnis zu der Frage E3: Einstellung gegenüber eines automatischen Starts der App (N = 143).

Auto-Start	Anzahl	rel. Häufigkeit [%]
Ja, ich finde es gut, wenn sich die App selber aktiviert und Autofahrer auf mich aufmerksam macht, ohne dass ich sie selbst starten muss.	36	25,17
Ich hätte in der App gerne die Wahl, ob sie sich selbst aktiviert oder nicht.	79	55,24
Nein, ich möchte nicht, dass die App ohne mein Handeln aktiv ist.	28	19,58

Ergebnis zu der Frage E4: „Wie viel wären Sie bereit einmalig für die App zu bezahlen?“ (weitere Antworten ergeben sich aus den Erläuterungen; N = 143).

Zahlungsbereitschaft	Anzahl	rel. Häufigkeit [%]
0,00 €	50	34,97
1,99 €	33	23,08
4,99 €	24	16,78
0,99 €	12	8,39
3,49 €	9	6,29
9,99 €	9	6,29
7,49 €	0	0,00
14,99 €	0	0,00
unsicher	3	2,10
nicht nutzen	2	1,40
keine Angabe	1	0,70

Ergebnis zu der Aussage E5: „Ich glaube an einen Sicherheitsgewinn durch das System.“ (N = 143).

Sicherheitsgewinn	Anzahl	rel. Häufigkeit [%]
Zustimmung	91	63,64
Ablehnung	52	36,36

Ergebnis zu der Aussage E6: „Es ist aktuell möglich die App kostenlos herunterzuladen und somit das System aktiv zu nutzen. Sind Sie bereit das zu tun?“ (N = 143).

Bereitschaft zum Download	Anzahl	rel. Häufigkeit [%]
Ja	66	46,15
Nein	77	53,85
Tatsächlich*	9	

*App war im Google Play Store für Android hinterlegt

Ergebnis zu der Aussage E7: „Wie oft lesen Sie die AGB und Datenschutzbestimmungen, wenn Sie eine App installieren oder einen Service im Internet nutzen?“ (N = 143).

AGB / Datenschutzbestimmungen	Anzahl	rel. Häufigkeit [%]
selten	65	45,45
nie	42	29,37
in 50 % der Fälle	21	14,69
oft	14	9,79
immer	1	0,70

Ergebnis zu der Aussage E8: „In wie vielen sozialen Netzwerken (z.B. facebook, LinkedIn, Pinterest) sind Sie Mitglied?“ (N = 143).

Anzahl Soziale Medien	Häufigkeit	rel. Häufigkeit [%]
2	49	34,27
1	26	18,18
3	25	17,48
0	22	15,38
4	10	6,99
5	7	4,90
> 5	4	2,80

Ergebnis zu der Aussage E9: „Haben Sie im Zeitraum Dezember 2017 - Januar 2018 an einer ähnlichen Umfrage teilgenommen, in der es auch um Smartphone-basierte Fahrradfahrsicherheit ging?“ (N = 143).

Teilnahme an Studie in Kapitel 5.1	Anzahl	rel. Häufigkeit [%]
Ja	8	5,59
Nein	135	94,41

C Anhang – Ergänzende Unterlagen zu der Untersuchung in Kapitel 5.4

In diesem Abschnitt sind die Versuchsdaten sowie weiterführende Tabellen, Grafiken und Abbildungen der im Unterkapitel 5.4 beschriebenen Studie dargestellt. Die Daten wurden im Rahmen einer Studienarbeit von Bandmann et al. (2019) erhoben.

C.1 Nutzungskontext

In diesem Abschnitt ist der Fragebogen³¹ der Vorbefragung mit der Software SoSci sowie die ausgewerteten Ergebnisse dargestellt.

C.1.1 Fragebogen nach Bandmann et al. (2019)

Hallo liebe Teilnehmerin, hallo lieber Teilnehmer,
vielen Dank, dass Du Dir die Zeit nimmst, an unserer Umfrage teilzunehmen. Im Rahmen einer Forschungsarbeit des Lehrstuhls für Ergonomie der Technischen Universität München wollen wir auf Basis der Bedürfnisse zukünftiger Nutzer ein innovatives Fahrradnavigationssystem entwickeln. Die Befragung dauert ca. 10 Minuten.

Deine Teilnahme an der Studie ist freiwillig. Du kannst jederzeit und ohne Angabe von Gründen die Teilnahme an dieser Studie beenden, ohne dass daraus Nachteile für Dich entstehen. Deine Angaben werden vollständig anonymisiert erhoben. Alle Deine Angaben werden selbstverständlich ausschließlich zu wissenschaftlichen Zwecken genutzt

³¹ Der in diesem Abschnitt präsentierte Fragebogen weicht aus Gründen der besseren Lesbarkeit in seiner Darstellung von dem tatsächlichen online Fragebogen von Bandmann et al. (2019) ab. Die Informationen (Texte und Abbildungen) sind jedoch deckungsgleich.

und strikt vertraulich behandelt. Ein Rückschluss auf Deine Person ist nicht möglich und die Teilnehmenden können zu keinem Zeitpunkt identifiziert werden.

Danke für Deine Unterstützung,
Cerys, Florine, Helen und Teresa

Teil A: Demographische Daten

A1 Wie alt bist du?

Jahre

A2 Welches Geschlecht hast Du?

- Männlich
- Weiblich
- Divers
- keine Antwort

Teil B: Fahrrad Allgemein

B1 Wie häufig fährst du Fahrrad?

- täglich
- mehrmals pro Woche
- mehrmals pro Monat
- mehrmals im Jahr
- nie

B2 Aus welchem Grund benutzt Du Dein Fahrrad?

Wir freuen und über Listen, sowie über Fließtext.

B3 Fährst Du häufig neue Strecken, die Du noch nicht kennst?

- oft
- gelegentlich

selten

nie

B4 Wie planst Du eine neue Route mit dem Rad?

Hier kannst Du mehrere Antworten auswählen.

- vor der Fahrt mit Onlinekarten
- vor der Fahrt mit Fahrradführer
- während der Fahrt mit Navigationssystem
- während der Fahrt mit Schildern
- andere:

B5 Nutzt Du während der Fahrt ein Navigationssystem?

Beispielsweise Google Maps, Garmin etc.

- Ja
- Nein

Teil C: Fahrradnavigation³²

C1 Wie häufig nutzt Du ein Navigationssystem beim Fahrradfahren?

- bei jeder Fahrt
- nur bei neuen Strecken
- um neue Wege zu finden
- andere:

C2 Welche/s Navigationssystem/e nutzt Du beim Radfahren?

Bitte möglichst genaue Modellangaben / Appnamen angeben.

C3 Aus welchem Grund nutzt Du das Navigationssystem?

Hier kannst Du mehrere Antworten auswählen.

- Navigation
- Strecke tracken
- Durchschnittsgeschwindigkeit ermitteln

³² Dieser Abschnitt wurde nur Befragten angezeigt, welche die Frage B5 bejaht haben.

- Leistung ermitteln
- andere

C4 In welcher/n Umgebung/en nutzt Du Dein Navigationssystem?

Hier kannst Du mehrere Antworten auswählen.

- Stadt
- Land
- Alpin (z. B. Mountainbiken)
- andere

C5 Anhand welcher Kriterien hast Du Dich für Dein Navigationssystem entschieden?

Hier kannst Du mehrere Antworten auswählen.

Erwähne bitte auch spezifische Aspekte, die dich zur Nutzung bewegt haben. Antworte bitte möglichst konkret.

- Preis
- Funktionalität
- Verfügbarkeit
- Größe
- Robustheit
- andere

C6 Was gefällt dir an Deinem Navigationssystem gut?

Wir freuen uns über Listen, sowie über Fließtext.

C7 Was gefällt dir an Deinem Navigationssystem nicht?

Wir freuen uns über Listen, sowie über Fließtext.

C8 Was fehlt dir an Deinem Navigationssystem?

Wir freuen uns über Listen, sowie über Fließtext.

C9 Welche Routenoptionen findest Du bei einem Fahrradnavigationssystem sinnvoll?

Hier kannst Du mehrere Antworten auswählen.

- kürzeste Route
- schnellste Route
- flachste Route
- im Grünen/ durch Parks
- weniger Ampeln
- viele befahrene Straßen meiden
- geteerte Straßen bevorzugen
- gut beleuchtet
- nur Fahrradwege
- Rundweg
- keine
- andere

C10 Wie viel wärest Du bereit für ein Fahrradnavigationssystem zu zahlen, das Deinen Wünschen und Anforderungen entspricht?

ca. €

C11 Hast Du noch weitere Ideen oder Anregungen für ein innovatives Fahrradnavigationssystem?

Wir freuen uns über Listen, sowie über Fließtext.

Teil D: kein Navigationssystem³³

D1 Warum nutzt Du kein Fahrradnavigationssystem?

³³ Dieser Abschnitt wurde nur Befragten angezeigt, welche die Frage B5 verneint haben.

D2 Was müsste Dir ein Fahrradnavigationssystem bieten, damit Du es nutzen würdest?

D3 Mit welcher Art von Geräten würdest Du navigieren werden wollen?

- Fahrradnavigationsgerät
- Smartphone
- andere:

D4 Wie viel wärst Du bereit für ein Fahrradnavigationssystem zu zahlen, das Deinen Wünschen und Anforderungen entspricht?

ca. €

Teil E: Abschluss

Vielen Dank für Deine Teilnahme!

Bei Rückfragen melde Dich gerne bei Teresa Hammer unter der Emailadresse: teresa.hammer@tum.de

Deine Antworten wurden gespeichert, Du kannst das Browser-Fenster nun schließen.

C.1.2 Ergebnisse

Die Umfrage füllten 94 Befragte vollständig aus (männlich: 51; weiblich: 41; andere: 1; enthalten: 1). Dabei liegt das durchschnittliche Alter bei 33,29 Jahren (SD = 12,97 Jahren; zwischen 17 und 64 Jahren).

Ergebnis zur Frage B1: „Wie häufig fährst du Fahrrad?“ (N = 94).

	täglich	mehrmals pro Woche	mehrmals pro Monat	mehrmals im Jahr	nie
Anzahl	30	38	19	7	0
rel. Häufigkeit [%]	31,91	40,43	20,21	7,45	0

Ergebnis zur Frage B2: „Aus welchem Grund benutzt Du Dein Fahrrad?“ (offene Frage; Mehrfachnennungen möglich; N = 94). Die relative Häufigkeit bezieht sich auf die Anzahl der Befragten und nicht auf die Anzahl der Nennungen (188).

Art	Anzahl	rel. Häufigkeit [%]
Freizeit	42	44,68
Sport	35	37,23
Mobilität in der Stadt	33	35,11
zur Arbeit	30	31,91
Umwelt & Gesundheit	19	20,21
Einkaufen & Besorgungen	14	14,89
letzte Meile	10	10,64
Alles	5	5,32

Ergebnis zur Frage B3: „Fährst Du häufig neue Strecken, die Du noch nicht kennst?“ (N = 94).

	oft	gelegentlich	selten	nie
Anzahl	16	49	28	1
rel. Häufigkeit [%]	17,02	52,13	29,79	1,06

Ergebnis zur Frage B4: „Wie planst Du eine neue Route mit dem Rad?“ (Mehrfachnennungen möglich; N = 94). Die relative Häufigkeit bezieht sich auf die Anzahl der Befragten und nicht auf die Anzahl der Nennungen (170).

Planungsart	Anzahl	rel. Häufigkeit [%]
vor der Fahrt mit Onlinekarten	77	81,91
vor der Fahrt mit Fahrradführer	5	5,32
während der Fahrt mit Navigationssystem	48	51,06
während der Fahrt mit Schildern	31	32,98
Andere: Karten, Zufall, Himmelsrichtung	9	9,357

Ergebnis zur Frage B5: „Nutzst Du während der Fahrt ein Navigationssystem?“ (N = 94).

	Ja	Nein
Anzahl	62	32
rel. Häufigkeit [%]	65,96	34,04

Ergebnis zur Frage C1: „Wie häufig nutzt Du ein Navigationssystem beim Fahrradfahren?“ (N = 62).³⁴

Nutzungsart	Anzahl	rel. Häufigkeit [%]
bei jeder Fahrt	11	17,74
nur bei neuen Strecken	46	74,19
um neue Wege zu finden	4	6,45
andere: Touren	1	1,61

Ergebnis zur Frage C2: „Welche/s Navigationssystem/e nutzt Du beim Radfahren?“ (Mehrfachnennungen möglich, N = 62).

Typ	Bezeichnung	Anzahl	rel. Häufigkeit [%]
Apps		57	70,37
	Google Maps	33	40,74
	Komoot	10	12,35
	Strava	5	6,17
	Apple Karte	2	2,47
	Garmin Karten	2	2,47
	OsmAnd	1	1,23
	naviki	1	1,23
	Bike Citizens	1	1,23
	Locus Map	1	1,23
	Cobi	1	1,23
Geräte		24	29,63
	Garmin Edge	14	17,28
	Wahoo	4	4,94
	Garmin Andere	3	3,70
	Bosch Nyon	1	1,23
	Falke	1	1,23
	Polar	1	1,23

³⁴ Den Abschnitt C des Fragebogens bekommen nur die Befragten angezeigt, welche die Frage B5 bejaht haben.

Ergebnis zur Frage C3: „Aus welchem Grund nutzt Du das Navigationssystem?“ (Mehrfachnennungen möglich, N = 62).

Nutzungsgrund	Anzahl	rel. Häufigkeit [%]
Navigation	58	93,55
Tracking	31	50,00
Durchschnittsgeschwindigkeit	17	27,42
Leistungsdaten	20	32,26
Andere	7	11,29

Ergebnis zur Frage C4: „In welcher/n Umgebung/en nutzt Du Dein Navigationssystem?“ (Mehrfachnennungen möglich, N = 62).

Nutzungsgebiet	Anzahl	rel. Häufigkeit [%]
Stadt	48	77,42
Land	41	66,13
Alpin	26	41,94
Andere	2	3,23

Ergebnis zur Frage C5: „Anhand welcher Kriterien hast Du Dich für Dein Navigationssystem entschieden?“ (Mehrfachnennungen möglich, N = 62).

Kaufkriterien	Anzahl	rel. Häufigkeit [%]
Funktionalität	47	75,81
Verfügbarkeit	30	48,39
Preis	22	35,48
Robustheit	16	25,81
Größe	11	17,74
Andere	9	14,52

Ergebnis zur Frage C6: „Was gefällt dir an Deinem Navigationssystem gut?“ (Mehrfachnennungen möglich, N = 54, 8 Enthaltungen).

Kriterien	Anzahl	rel. Häufigkeit [%]
funktionale Vielfalt	21	38,89
Verfügbarkeit (keine zusätzl. Kosten o. Gerät)	14	25,93
Zuverlässigkeit d. Angaben	14	25,93
Übersichtlichkeit	14	25,93
Bedienbarkeit	12	22,22
Alternative Routen	8	14,81
Konnektivität	7	12,96
Individualisierbarkeit	5	9,62
Robustheit	3	5,56

Ergebnis zur Frage C7: „Was gefällt dir an Deinem Navigationssystem nicht?“ (Mehrfachnennungen möglich, N = 57, 5 Enthaltungen).

Kriterien	Anzahl	rel. Häufigkeit [%]
fehlende Übersichtlichkeit (Karte)	10	17,54
schlechte Lesbarkeit (Display)	9	15,79
schlechte Flexibilität der Routen	9	15,79
mangelnde Akkukapazität	9	15,79
unzureichende Zuverlässigkeit	7	12,28
schlechte auditive Ansagen	6	10,53
unzureichende Robustheit	5	8,77
nichts	4	7,02
Datenschutz bedenken	3	5,26
Preis	3	5,26
nicht fest verbaut	3	5,26
fehlende Konnektivität	1	1,75

Ergebnis zur Frage C8: „Was fehlt dir an Deinem Navigationssystem?“ (Mehrfachnennungen möglich, N = 44, 18 Enthaltungen).

Kriterien	Anzahl	rel. Häufigkeit [%]
nichts	13	29,55
Flexibilität bei den Routen	9	20,45
Übersichtlichkeit	9	15,91
Lesbarkeit, Bedienbarkeit	6	20,45
Connectivität	5	11,36
auditive Ansagen	4	9,09
Gefahrenhinweise	1	2,27
Datenschutz	1	2,27

Ergebnis zur Frage C9: „Welche Routenoptionen findest Du bei einem Fahrradnavigationssystem sinnvoll?“ (Mehrfachnennungen möglich, N = 62).

Routenoptionen	Anzahl	rel. Häufigkeit [%]
viel befahrene Straße meiden	47	75,81
schnellste Route	38	61,29
im Grünen / durch Parks	36	58,06
kürzeste Route	32	51,61
wenige Ampeln	32	51,61
geteerte Straßen bevorzugen	31	50,00
flachste Route	31	50,00
nur Fahrradwege	31	50,00
Rundweg	19	30,65
gut beleuchtet	20	32,26
andere	6	9,68
keine	0	0,00

Ergebnis zur Frage C10: „Wie viel wärst Du bereit für ein Fahrradnavigationssystem zu zahlen, das Deine Wünsche und Anforderungen entspricht?“ (N = 62).

	Werte
Mittelwert	168 €
Standardabweichung	195 €
Minmal	0 €
Maximal	1000 €

Ergebnis zur Frage D1: „Warum nutzt Du kein Fahrradnavigationssystem?“ (Mehrfachnennungen möglich, N = 32).³⁵

Kriterien	Anzahl	rel. Häufigkeit [%]
nicht notwendig (vorherige Planung, Gedächtnistraining)	13	40,63
keines Vorhanden	6	18,75
keine Halterung	5	15,63
Preis	3	9,38
Ablenkung	3	9,38
nutze Schilder	2	6,25
kein gutes Gefunden	2	6,25
nutze doch ein Navi	2	6,25
Angst vor Diebstahl	1	3,13
wusste nicht das es so was gibt	1	3,13
Handy zu Unübersichtlich	1	3,13

Ergebnis zur Frage D3: „Mit welcher Art von Geräten würdest Du navigieren werden wollen?“ (N = 32).

System	Anzahl	rel. Häufigkeit [%]
Fahrradnavigationssystem	12	37,50
Smartphone App	19	59,38
Andere	1	3,13

³⁵ Den Abschnitt D des Fragebogens bekommen nur die Befragten angezeigt, welche die Frage B5 verneint haben.

Ergebnis zur Frage D4: „Wie viel wärst Du bereit für ein Fahrradnavigationssystem zu zahlen, das Deinen Wünschen und Anforderungen entspricht?“ (N = 32).

	Werte
Mittelwert	65 €
Standardabweichung	84 €
Minimal	0 €
Maximal	400 €

C.1.3 Persona

Die im folgenden dargestellte Persona ist im Rahmen der Studienarbeit von Bandmann et al. (2019) definiert worden:

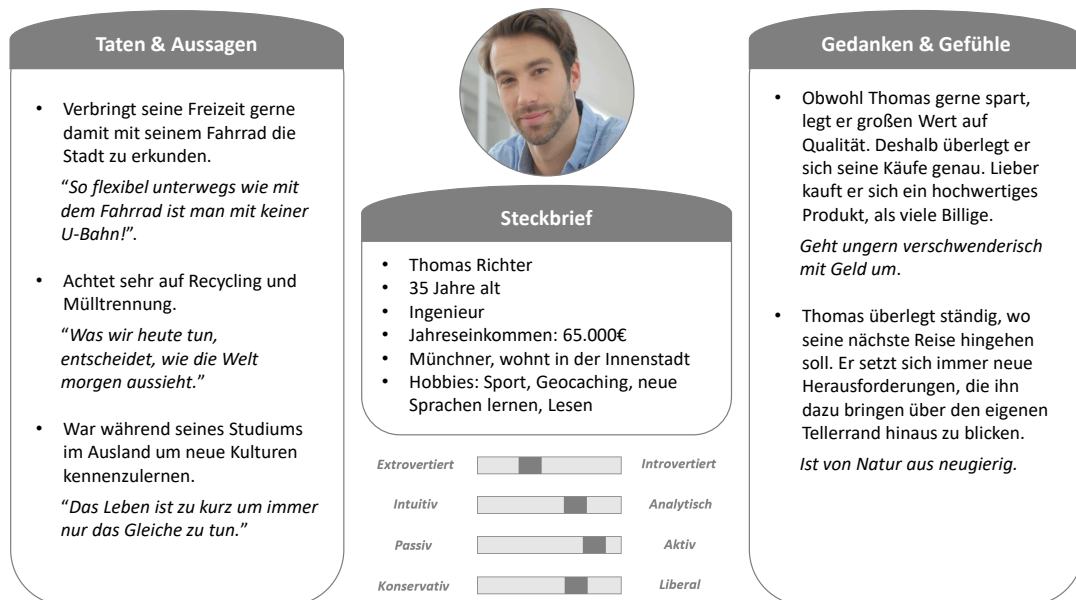


Abbildung C.1: Persona (Bandmann et al., 2019).

C.2 Manöver der Navigationssysteme

Zur Gewährleistung der Vergleichbarkeit haben alle System die selben Manöver abgefahren. Dazu wurden die im nachfolgenden aufgelisteten Situationen definiert. Szenario Nr. 2 wurde auf einem Fahrradweg gefahren alle anderen fanden auf der Straße statt, da kein spezieller Fahrradweg vorhanden war.

Tabelle C.1: Navigationsmanöver mit Angabe des Ortes in München (die dazugehörigen grafischen Darstellungen sind im Anhang C.4 hinterlegt; nach Bandmann et al. (2019))

Nr.	Szenarien	Start und Ziel
1	Überquerung zweier Kreuzungen	Abbachstraße 37 nach Abbachstraße 10
2	rechts abbiegen (ca. 90°)	Pelkovenstraße 67 nach Plauener Straße 11
3	links abbiegen und überqueren der nächsten Kreuzung	Plauener Straße 2 nach Jenaer Straße 7
4	Überqueren einer Kreuzung und dann rechts abbiegen	Jenaer Straße 5 nach Plauener Straße 2
5	links und dann direkt rechts Abbiegen	Daimlerstraße 9 nach Daimlerstraße 1
6	schräg links abbiegen (> 90°)	Siegfriedstraße 17 nach Destouchesstraße 10
7	scharf rechts abbiegen (< 90°)*	Muffatstraße 11 nach Destouchesstraße 10
8	Wendung	Chemnitzer Platz 10 nach Jenaer Straße 7
9	Zielankunft	Chemnitzer Platz 10

*Beim Garmin Edge musste dieses Szenario in umgekehrter Richtung erfolgen, da die Destouchestraße in den Karten noch als Einbahnstraße hinterlegt ist.

C.3 Ergebnisse der Expertenevaluation bestehender Navigationssysteme

Tabelle C.2: Gruppierte und komprimierte Zusammenstellung der Ergebnisse des Cognitive Walkthrough der ausgewählten Navigationssysteme.

Kartenbasierte Systeme	Abstrakte Systeme
<ul style="list-style-type: none">– Priorisierung von Informationen– unnötige Informationen ausblenden– Distanz: nicht metrisch sondern grafisch (nächsten Manövers & Fortschritt zum Ziel)– Ego-Punkt sollte klar erkennbar sein– Kartenmaßstab sollte nicht zu groß sein– Konsistenz bei der Manöverangabe („geradeaus“ auch anzeigen)– Richtungspfeil sollte nicht das Szenario überdecken– Rotieren der Karte begrenzen– Perspektivenwechsel vermeiden, Nutzerbevorzugen gegenüber Vogelperspektive– Farben und Kontrast gezielt einsetzen– Dynamische Anzeigen benötigen mehr Aufmerksamkeit	<ul style="list-style-type: none">– Erläuterung der Elemente notwendig– Systemstatus anzeigen– Feedback beim ausführen des richtigen Manövers– Redundanten Kodierung: Töne verwenden– Blinkende Elemente erzeugt Ablenkung– Keine Fall-Back Ebene bei Unklarheiten vorhanden– Übereinstimmung reale Welt vs. System problematisch– Streckenfortschritt nicht erkenntlich– Fortschrittsbalken statt numerischem Zähler– Eher Tracking anstatt Navigation– Minimalistisches Design positiv

Tabelle C.3: Anzahl der verletzten Heuristiken der jeweiligen Navigationssysteme.

Grad der Verletzung	Systeme	Heuristiken									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	Google Maps								1		
	Garmin Edge1000										
	SmartHalo					1			2		
	Beeline										
1	Google Maps	1	3							1	
	Garmin Edge1000	2								2	
	SmartHalo	3				1				2	
	Beeline	2			3					3	
2	Google Maps		4		3					2	
	Garmin Edge1000	1	2		2		1		3	1	
	SmartHalo	1	1		1		1				
	Beeline	1	3		4	1		1			
3	Google Maps	1	2			1			1	1	
	Garmin Edge1000	3	3		3			1	2		
	SmartHalo	2	3		1	1					
	Beeline		8		1				1		
4	Google Maps		1			1					
	Garmin Edge1000	1	1		1				1		
	SmartHalo	1			1				2		
	Beeline	3			1	1	1			1	

Tabelle C.4: Zusammenfassung der Anregungen aus der abschließenden Befragung der Experten zu den vier Navigationssystemen.

Kartenbasierte Systeme	Abstrakte Systeme
– Karte hilfreich, kann auch minimalistisch sein (Ausschnitt nicht immer optimal)	– Verwechslungsgefahr zw. Fortschritt und Distanz zum Manöver
– zu viele Informationen auf der Karte	– Wenig Ablenkung gut ablesbar
– Redundante Kodierung	– Minimalistisch
– Fahrerperspektive	– Wenig Ablenkung, gut ablesbar
– Entspricht erlerntem Vorwissen	– keine Interpretation von Zahlen notwendig
– Ego-Punkt zentriert	– Platzsparendes Gerätemaß
– Distanz in 10m Schritten oder auffüllender Pfeil	– Kompass ähnlicher Kreis zur Richtungsanzeige
– Angaben zur Zielankunft	– Verwechslungsgefahr zw. Fortschritt und Distanz zum Manöver
– Zeitpunkt der Ansagen ungenau	– Die Navigationsangaben sollte peripher wahrnehmbar sein

C.4 Daten zum high-fidelity Prototypen

C.4.1 HMI Konzept

Die hier dargestellten Anzeigearsprägungen sind an die im Anhang C.2 definierten Szenarien angelehnt. Zur Durchführung der zweiten Expertenevaluation (siehe Unterkapitel 5.4.4) wurden diese noch animiert.

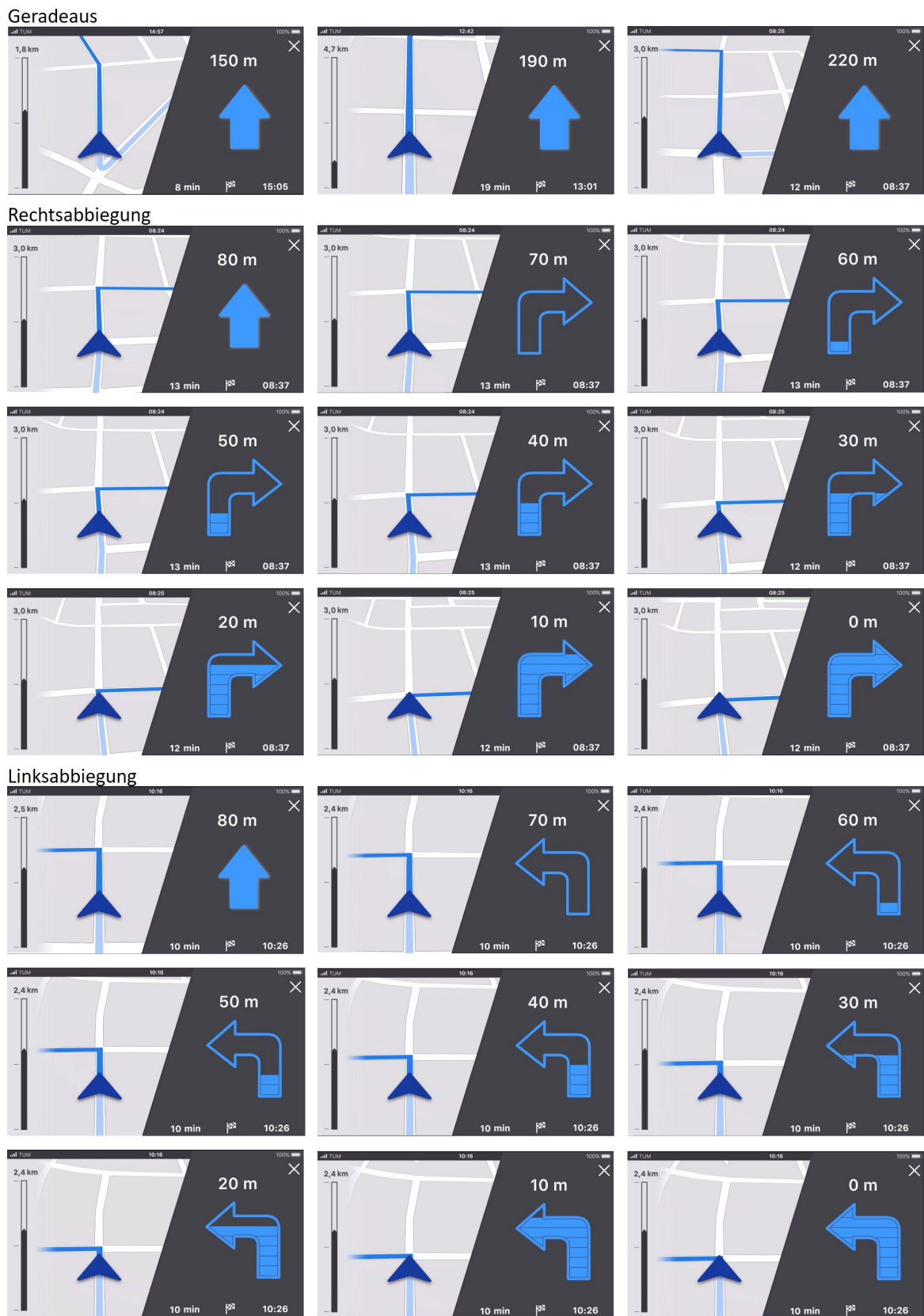


Abbildung C.2: Anzeigezustände des Fahrrad-HMI beim Geradeaus fahren (Szenario Nr. 1) und jeweils bei der Annäherung an ein Abbiegen nach links und rechts (Szenario Nr. 2 & 3; Bandmann et al., 2019).

Links-rechts Kombination

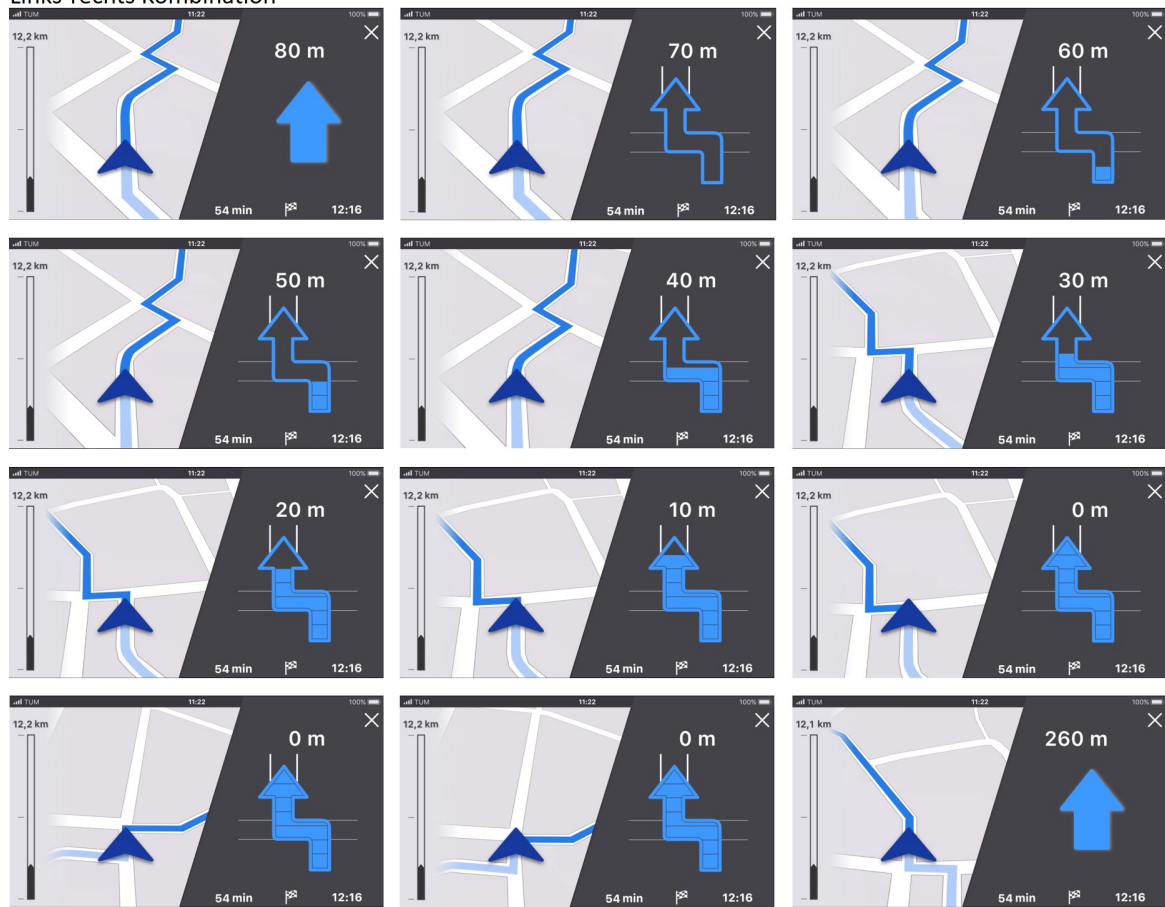
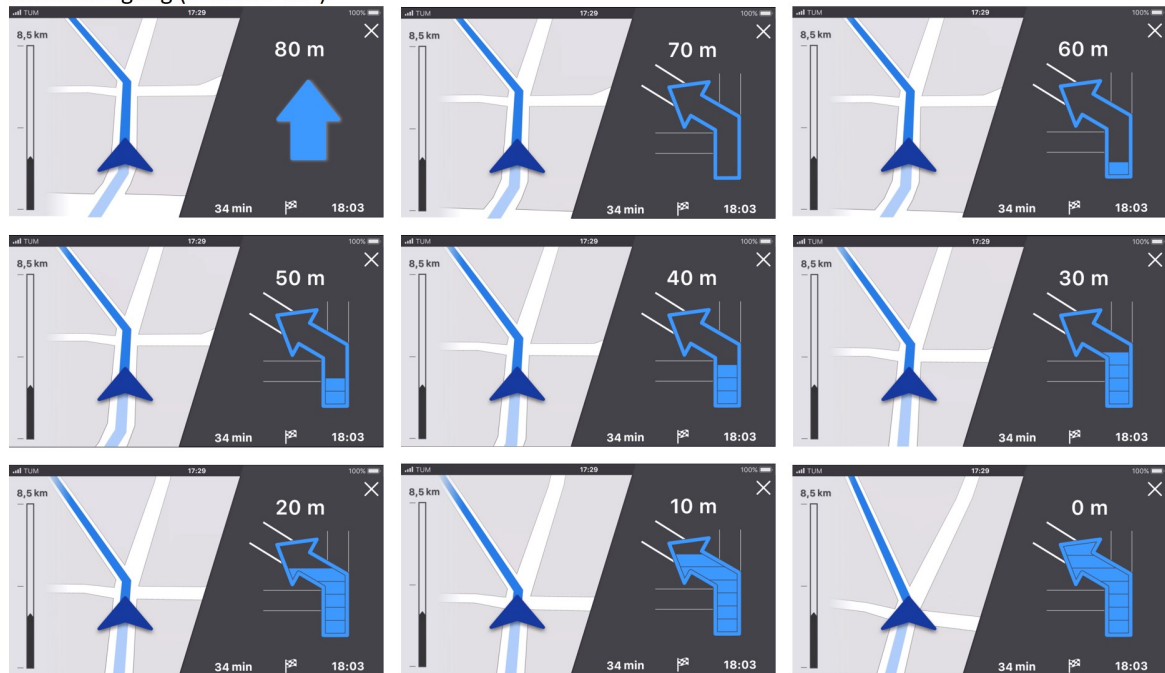


Abbildung C.3: Anzeigezustände des Fahrrad-HMI bei einer unmittelbar aufeinander folgenden Kombination aus einer Links- und Rechtskurve (Szenario Nr. 5; Bandmann et al., 2019).

Linksabbiegung (Winkel $> 90^\circ$)



Rechtsabbiegung (Winkel $< 90^\circ$)

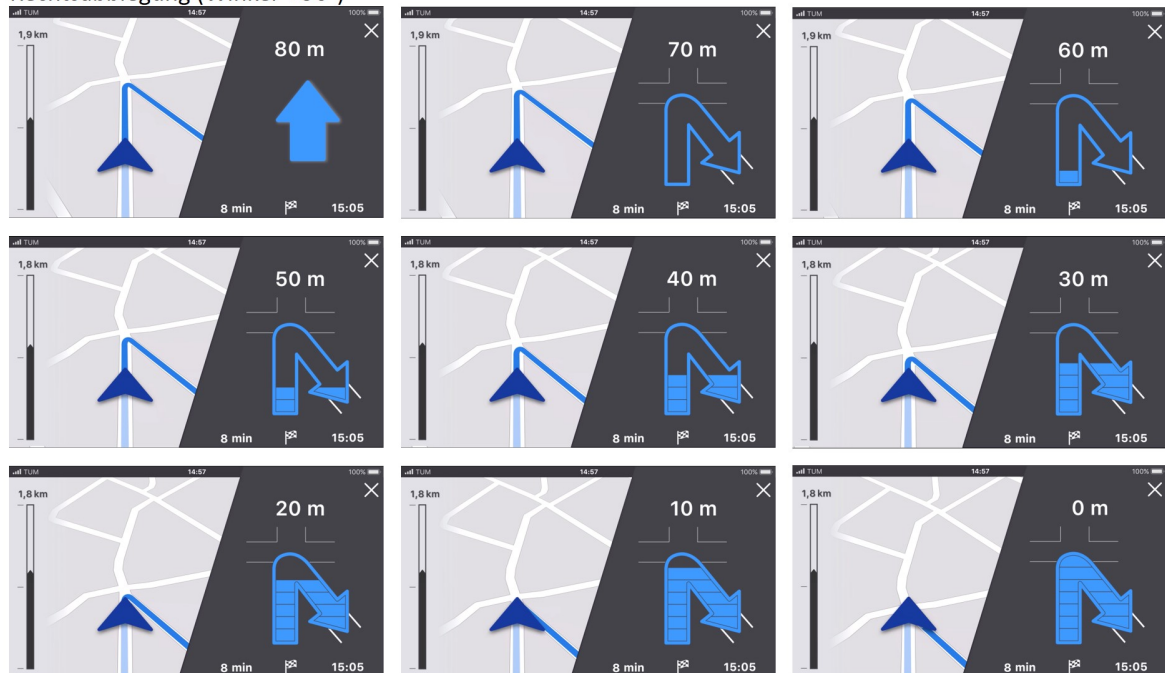
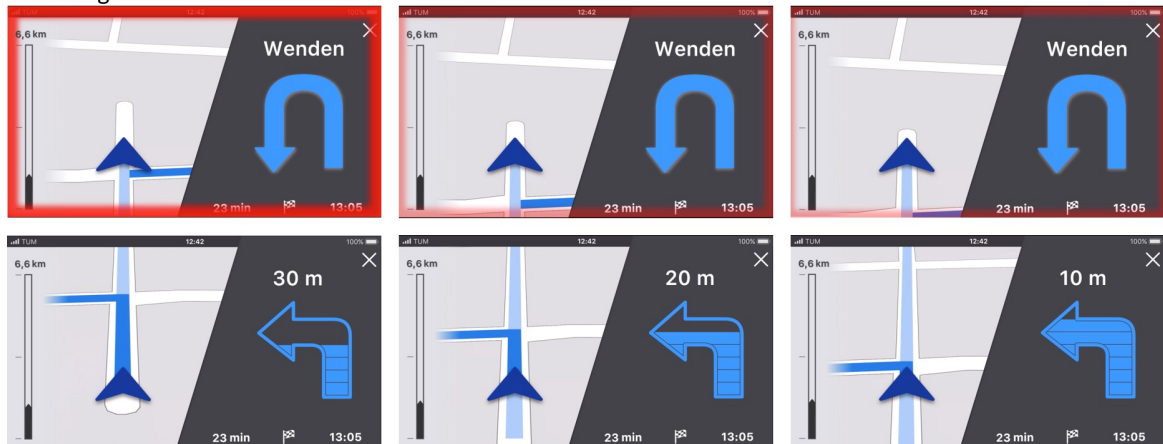


Abbildung C.4: Anzeigezustände des Fahrrad-HMI bei einem Abbiegevorgang mit einem Winkel von größer (Szenario Nr. 6) oder kleiner (Szenario Nr. 7) als 90° (Bandmann et al., 2019).

Wendung



Zielankunft

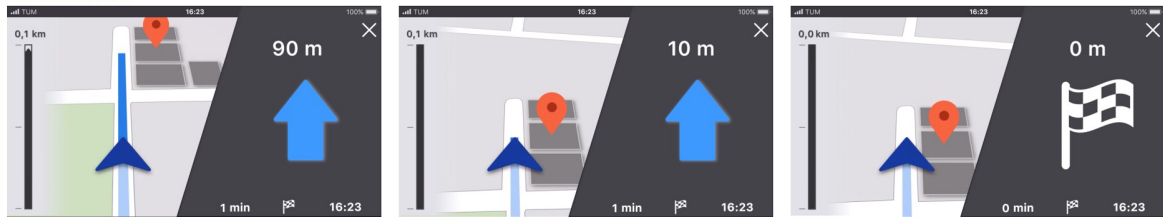


Abbildung C.5: Anzeigezustände des Fahrrad-HMI bei Anzeige eines Wendemanövers (Szenario Nr. 8) und dem Erreichen des Zielorts (Szenario Nr. 9) (Bandmann et al., 2019).

C.4.2 Ergonomische Parameter

Zeichenhöhen Zur Überprüfung der Schrifthöhe wird die DIN EN ISO 15008 für den Einsatz im Fahrzeug herangezogen. Diese gibt eine minimale Zeichenhöhe von 12 Bogenminuten vor und erachtet eine Zeichenhöhe von größer gleich 20 Bogenminuten als empfehlenswert. Ab einer Höhe von 16 Bogenminuten gilt diese als akzeptabel.







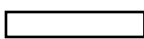







Abbildung C.6: Angaben zu den im Fahrrad-HMI unterschiedlichen Zeichenhöhen bei 50 cm Abstand vom Kopf zum Lenker auf einem 5" Display (nach Bandmann et al., 2019).

Tabelle C.5: Berechnung und Überprüfung der Zeichenhöhen des entwickelten Fahrrad-HMI nach der DIN EN ISO 15008 bei einer Displaygröße von 5" und einem Abstand von 50 cm vom Kopf zum Lenker (nach de Waard et al., 2017).

gemessene Schrifthöhen [mm]	Schrifthöhe in Bogenminuten	Eignung nach DIN EN ISO 15008:2017
1,8	12,4	Mindestwert
3,9	26,8	Empfehlenswert
2,2	15,1	Mindestwert


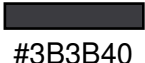

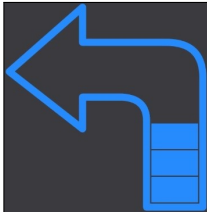


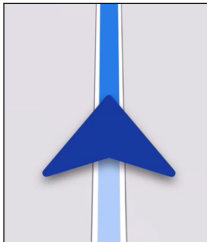

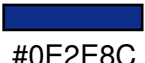
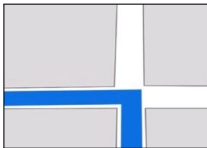
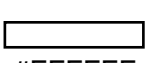




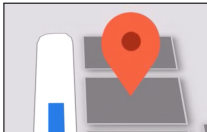
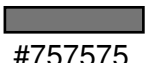
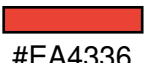
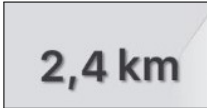

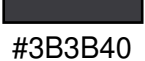
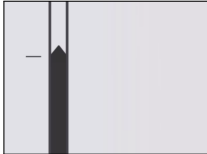
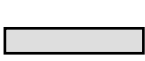

Farben und Kontraste Im finalen Design des Prototypen werden vorwiegend nur graue und blaue Farbtöne verwendet. Für Naturfläche wird ein dezentes Grün verwendet und bei der Zielankunft oder einer Wendung kommt die Farbe Rot zum Einsatz. Die exakten Farben mit Farbcode sind der nachfolgenden Tabelle zu entnehmen:

Tabelle C.6: Verwendete Farben und deren Anwendungszweck im Fahrrad-HMI (nach Bandmann et al., 2019).

Farbe	Code	Anwendung
	#2F2F2F	Füllung des Fortschritts
	#3B3B40	Hintergrundfarbe des rechten Bereichs der Navigation
	#757575	hervorgehobene Gebäude bei der Zielankunft
	#DEDEDE	angrenzende Gebäude
	#FFFFFF	Straßen
	#0E2E8C	Richtungspfeil in der Karte
	#1373D9	vorgeschlagene und zurückgelegte Route
	#268CFE	schematischer Navigationspfeil
	#A4EBB2	Naturflächen
	#D0021B	Wendung
	#970A09	Zielmarkierung
	#EA4336	Zielmarkierung

Anhand der Farben ergeben sich aus den Anzeigezuständen (siehe Anhang C.4.1) die in der Tabelle C.7 hinterlegten Kontrastverhältnisse.

Tabelle C.7: Kontrastverhältnisse der Elemente zum jeweiligen Hintergrund (nach Bandmann et al., 2019).

HMI Element	Farbe des Hintergrunds	Farbe des Elements	Kontrastverhältnis*	Einstufung nach der ISO 15008:2017		
				Nacht	Tag**	Sonne
	 #3B3B40	 #FFFFFF	11,14:1	✓	✓	✓
	 #3B3B40	 #268CFE	3,32:1	⚡	✓	✓
	 #DEDEDE	 #0E2E8C	8,73:1	✓	✓	✓
	 #FFFFFF	 #1373D9	4,68:1	⚡	✓	✓
	 #A4EBB2	 #0E2E8C	8,44:1	✓	✓	✓
	 #757575	 #EA4336	1,17:1	⚡	⚡	⚡
	 #DEDEDE	 #3B3B40	8,27:1	✓	✓	✓
	 #DEDEDE	 #2F2F2F	9,95:1	✓	✓	✓

* <https://webaim.org/resources/contrastchecker/>

**Tageslicht und Zwielicht haben den gleichen Grenzwert.

C.4.3 Ergebnisse der Expertenevaluation zum entwickelten Fahrrad-HMI

Tabelle C.8: Komprimierte Zusammenstellung der Ergebnisse des Cognitive Walkthrough zum entwickelten Navigationssystem.

Aspekte zur Verbesserung

- Auffüllen des Pfeiles erzeugt eine Ablenkung.
 - Numerische Distanzangaben sind redundant zur Pfeilauffüllung. Diese können ggf. eingespart werden.
 - Doppelpfeil kann zu Interpretationsproblem führen.
 - Strategie beim auffüllen des Pfeils in komplexen Situationen schwer verständlich.
 - Timing der Karte nicht immer optimal.
 - Angrenzende Straßen in der schematischen Ansicht können hilfreich sein.
-

Tabelle C.9: Zusammenfassung der genannten Aspekte der abschließenden Befragung der Experten zu dem entwickelten Fahrrad-HMI.

Positive Aspekte	Negative Aspekte
– Karte minimalistisch	– Straßennamen fehlen
– Gute Kontraste zw. den Elementen	– Pfeil beim Wenden nicht konsistent
– Darstellung schlüssig und klar strukturiert	– Kartenbereich vergrößern
– Perspektivische Kartenansicht hilfreich	– Individualisierbarkeit fehlt
– Drehen der Karte	– Feedback bei Zielankunft (Gamification)
– Abbiegepfeil in einfachen Situationen gut	– Auditive Ansagen oder Signale
– Ansprechendes Design	– Kontrast bei Tageslicht
– Wenden gut gelöst	– Menü fehlt, Beenden der Navigation nicht eindeutig
– Fokus nur auf dem nächsten Manöver	– Adaptive Layout (Größe der Bereiche anpassen, je nach Situation)

D Anhang – Ergänzende Unterlagen zu der Untersuchung in Kapitel 5.5

In diesem Abschnitt sind die Versuchsdaten sowie weiterführende Tabellen, Grafiken und Abbildungen der im Unterkapitel 5.5 beschriebenen Studie dargestellt. Die Daten wurden im Rahmen einer Studienarbeit von F. Winkler (2020) erhoben.

D.1 Versuchsunterlagen

Die im folgenden aufgeführten Versuchsunterlagen können in ihrer jeweiligen Darstellungsweise von den tatsächlich im Versuch verwendeten Unterlagen abweichen. Texte und Abbildungen, welche den Probanden zur Verfügung gestellt wurden, sind jedoch unverändert.

D.1.1 Demografischer Fragebogen

Bitte füllen Sie nachfolgende Informationen zu Ihrer Person aus

1. Geschlecht: weiblich männlich divers
2. Alter: Jahre
3. Haben Sie eine Farbfehlsichtigkeit?
 - Nein
 - Rot-Grün-Farbfehlsichtigkeit
 - Blau-Geld-Farbfehlsichtigkeit
 - Sonstiges:
4. Besitzen Sie einen Autoführerschein und wenn ja, seit wie vielen Jahren?
 - Ja, seit Jahren
 - Nein

5. Besitzen Sie Vorerfahrung in der allgemeinen Nutzung von Navigationssystemen (Auto, Fahrrad etc.)?

- Ja
- Nein

6. Besitzen Sie Vorerfahrungen speziell in der Nutzung von Fahrradnavigationssystemen?

- Ja
- Nein

7. Wie häufig fahren Sie während der Fahrradsaison Fahrrad?

- Täglich
- mehrmals pro Woche
- mehrmals pro Monat
- mehrmals im Jahr
- nie

D.1.2 Modifizierter PSSUQ nach Götze et al. (2013) und F. Winkler (2020)

	Strongly agree					Strongly disagree		Not Applicable
	1	2	3	4	5	6	7	N/A
1. I could effectively complete the task and scenarios using this navigation system.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2. It was easy to find the information needed.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3. The interface of the navigation system was pleasant.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4. I liked using the interface of this navigation system.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5. The arrow signals / distance to action displayed on the navigation system were/- was easy to read.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6. Reading information from the navigation system was physically effortful.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7. Reading information from the navigation system was mentally effortful.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
8. The navigation system displayed information in a way that caused me fatigue.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
9. The layout of the navigation system distracted me from completing tasks.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
10. The layout of the navigation system was difficult to pay attention to.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
11. The layout of the navigation system prevented me from reading the display of the navigation system.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
12. The layout of the navigation system allowed me to detect signals very easily.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

D.1.3 Darstellungen der zur Okklusion verwendenden Konzepte und deren Eigenschaften

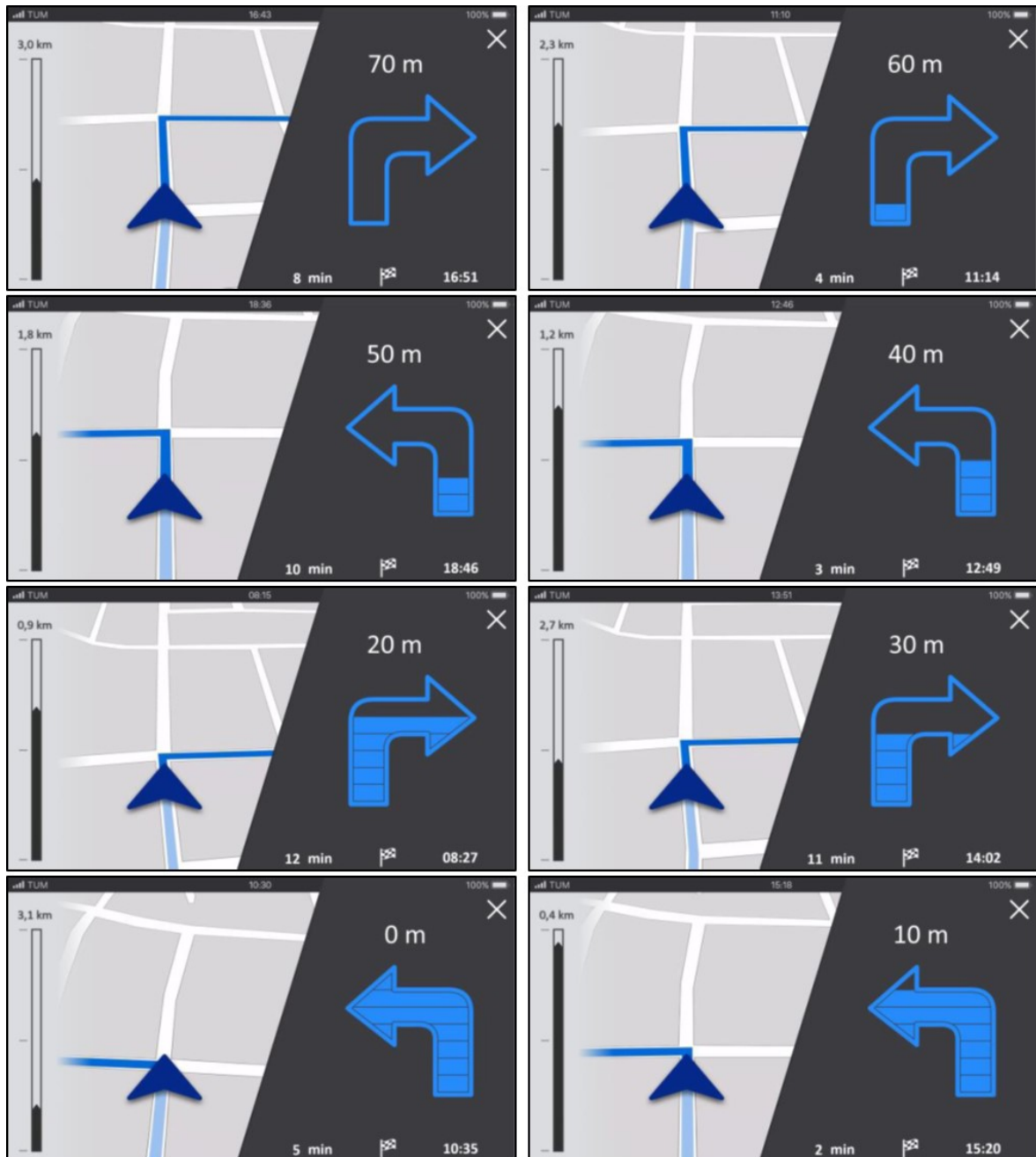


Abbildung D.1: Verwendete Ausprägungen des Fahrrad-HMI Konzepts (nach Bandmann et al., 2019; F. Winkler, 2020).

Die ergonomischen Kriterien zur Schriftgröße und des Kontrastes sind dem Anhang C.4.2 zur Entwicklung des Fahrrad-HMI zu entnehmen.

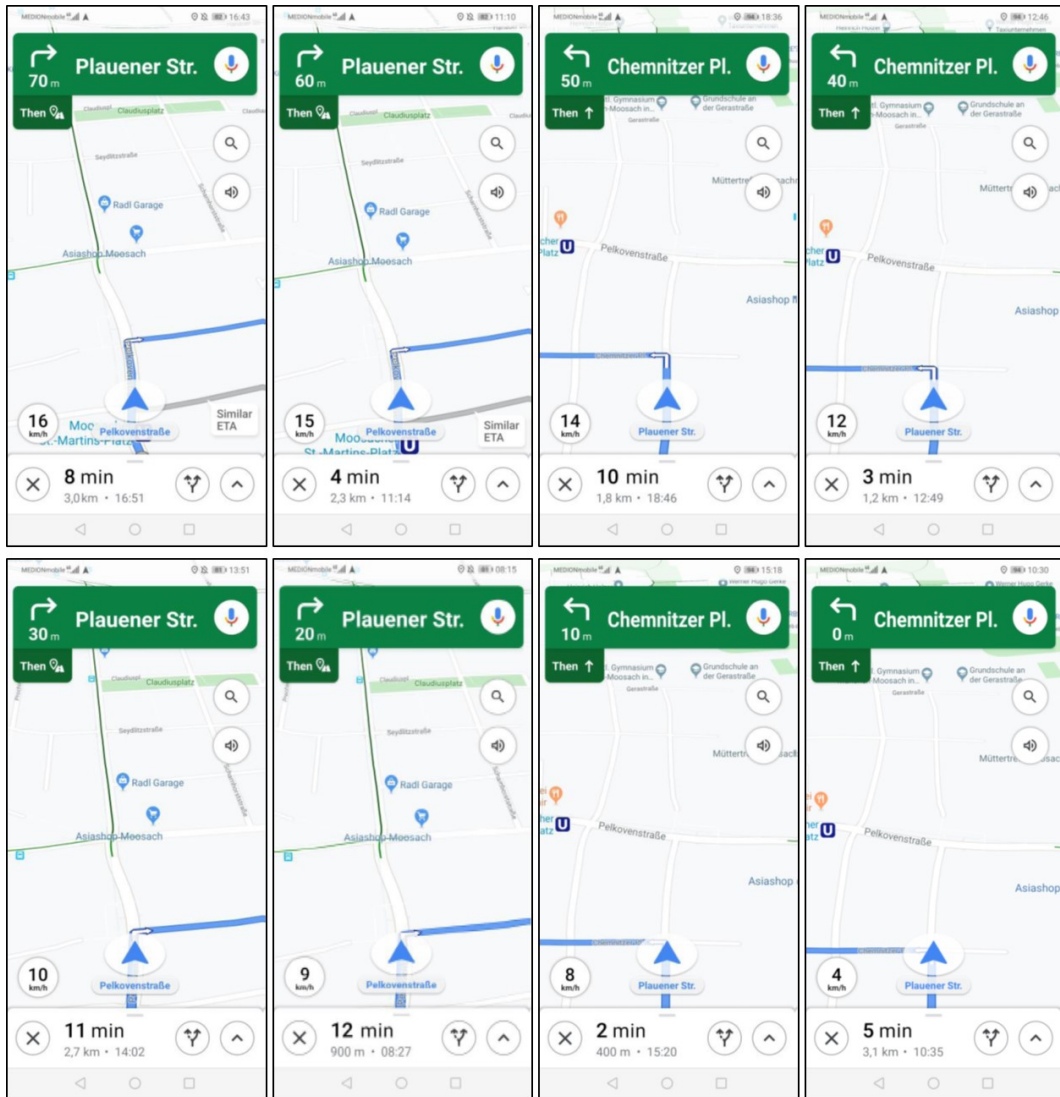


Abbildung D.2: Verwendete Ausprägungen des HMI von Google Maps (F. Winkler, 2020).

Tabelle D.1: Berechnung und Überprüfung der Zeichenhöhen für das Google Maps HMI (Schriftart: Roboto) nach der DIN EN ISO 15008 bei einer Displaygröße von 5" und einem Abstand von 50 cm vom Kopf zum Lenker (nach de Waard et al., 2017).

Objekt	gemessene Schrifthöhen [mm]	Schrifthöhe in Bogenminuten	Eignung nach DIN EN ISO 15008
Min. bis Zielankunft	2,9	19,9	Akzeptabel
Distanz bis zum Richtungs- wechsel	2,5	17,2	Akzeptabel
Ankunftszeit und verbleiben- de Distanz	1,8	12,4	Mindestwert

D.1.4 Fragen des Okklusionstests mit Antwortspektrum

Nr.	Okklusionsaufgabe (Frage)	Antwortspektrum
A	In welche Richtung erfolgt der nächste Richtungswechsel?	- Rechts - Links
B	Wie groß ist die Distanz zum nächsten Richtungswechsel?	- 0 m (4 km/h) - 10 m (8 km/h) - 20 m (9 km/h) - 30 m (10 km/h) - 40 m (12 km/h) - 50 m (14 km/h) - 60 m (15 km/h) - 70 m (16 km/h)
C	In wie vielen Minuten wird das Ziel erreicht?	- 5 min - 12 min - 11 min - 2 min - 3 min - 4 min - 10 min - 8 min
D	Um wie viel Uhr wird das Ziel erreicht?	- 08:27 Uhr - 10:35 Uhr - 11:14 Uhr - 12:49 Uhr - 14:02 Uhr - 15:20 Uhr - 16:51 Uhr - 18:46 Uhr
E	In wie vielen Kilometern wird das Ziel erreicht?	- 0,9 km - 3,1 km - 2,7 km - 0,4 km - 2,3 km - 1,2 km - 3,0 km - 1,8 km

D.2 Daten und Ergebnisse

In diesem Abschnitt sind die Versuchsdaten sowie die relevanten Abbildungen der Untersuchung dargestellt.

D.2.1 Demographische Daten

An der Studie haben insgesamt 32 Versuchspersonen (19 männlich, 13 weiblich) mit einem durchschnittlichen Alter von 26,9 Jahren (SD = 3,95 Jahre) bei einer Altersspanne von 22 bis 43 Jahren teilgenommen. Zwei der Probanden berichten von einer bestehenden Rot-Grün-Farbfehlsichtigkeit. 31 Probanden sind im Besitz eines Autoführerscheins. Im Durchschnitt besitzen die Teilnehmer ihre Fahrerlaubnis seit 9,2 Jahren (SD = 3,53 Jahre).

Ergebnis zur Frage 5: „Besitzen Sie Vorerfahrung in der allgemeinen Nutzung von Navigationssystemen (Auto, Fahrrad etc.)?“ (N = 32).

	Ja	Nein
Anzahl	31	1
rel. Häufigkeit [%]	96,88	3,23

Ergebnis zur Frage 6: „Besitzen Sie Vorerfahrungen speziell in der Nutzung von Fahrradnavigationssystemen?“ (N = 32).

	Ja	Nein
Anzahl	12	20
rel. Häufigkeit [%]	37,50	62,50

Ergebnis zur Frage 7: „Wie häufig fahren Sie während der Fahrradsaison Fahrrad?“ (N = 32).

	täglich	mehrmals pro Woche	mehrmals pro Monat	mehrmals im Jahr	nie
Anzahl	11	8	4	6	3
rel. Häufigkeit [%]	34,38	25,00	12,50	18,75	9,38

D.2.2 Ergebnisse zum Okklusionsversuch

Tabelle D.2: Mauchly-Test auf Sphärizität.

	Mauchly's W	Approx. X^2	df	p-value	Greenhouse- -Geisser ϵ	Huynh-Feldt ϵ	Untergrenze ϵ
Anzeigedauer	0.038	96.918	5	< .001	0.420	0.429	0.333
Okklusionsaufgabe	0.624	13.870	9	0.128	0.856	0.975	0.250
Konzept * Anzeigedauer	0.081	74.731	5	< .001	0.468	0.483	0.333
Konzept * Okklusionsaufgabe	0.433	24.626	9	0.003	0.784	0.882	0.250
Anzeigedauer * Okklusionsaufgabe	1.336e-6	362.560	77	< .001	0.412	0.500	0.083
Konzept * Anzeigedauer * Okklusionsaufgabe	8.112e-6	314.219	77	< .001	0.411	0.498	0.083

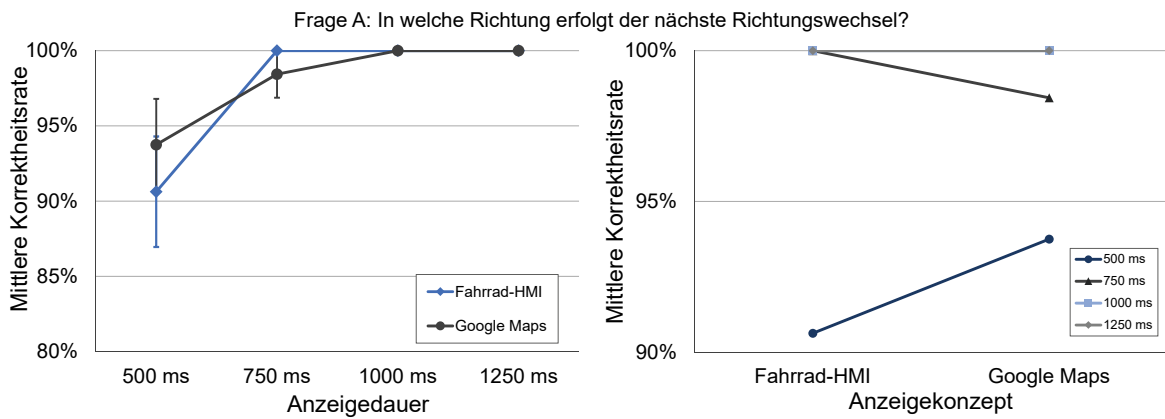


Abbildung D.3: Linienplot zu der Okklusionsaufgabe Nr. A (nach F. Winkler, 2020).

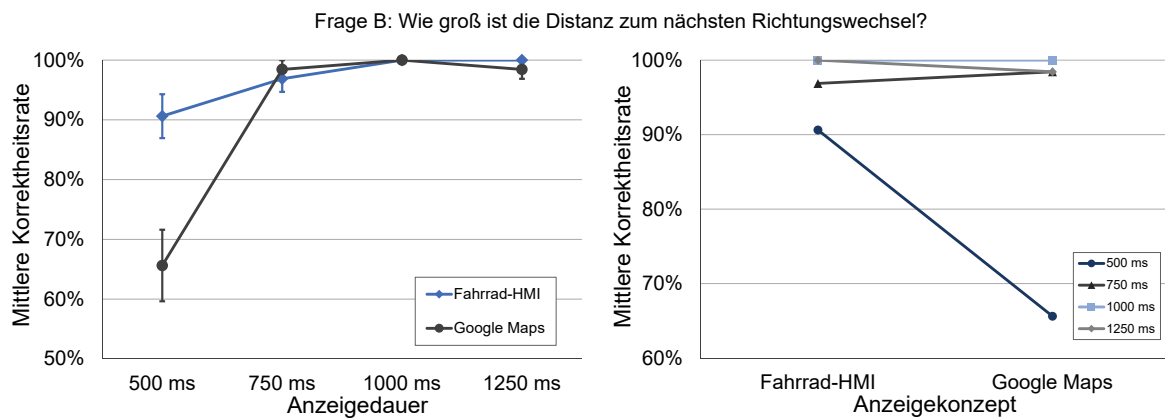


Abbildung D.4: Linienplot zu der Okklusionsaufgabe Nr. B (nach F. Winkler, 2020).

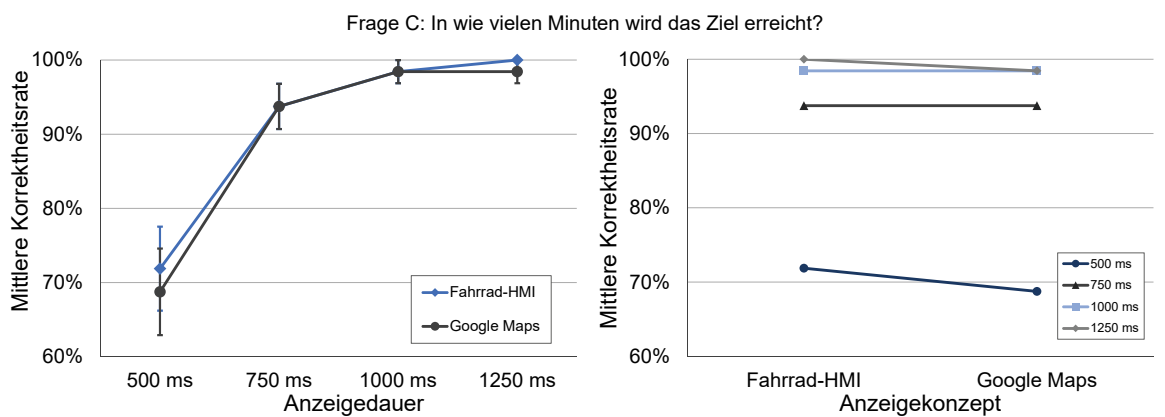


Abbildung D.5: Linienplot zu der Okklusionsaufgabe Nr. C (nach F. Winkler, 2020).

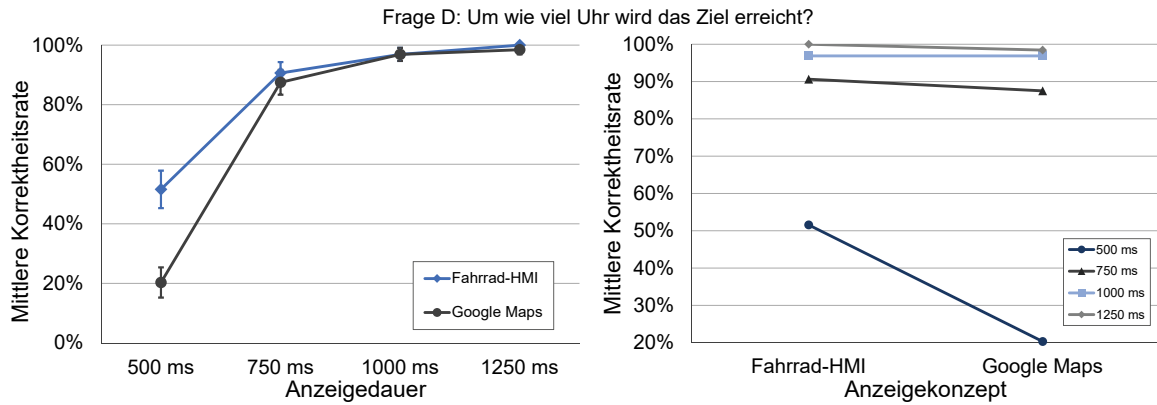


Abbildung D.6: Linienplot zu der Okklusionsaufgabe Nr. D (nach F. Winkler, 2020).

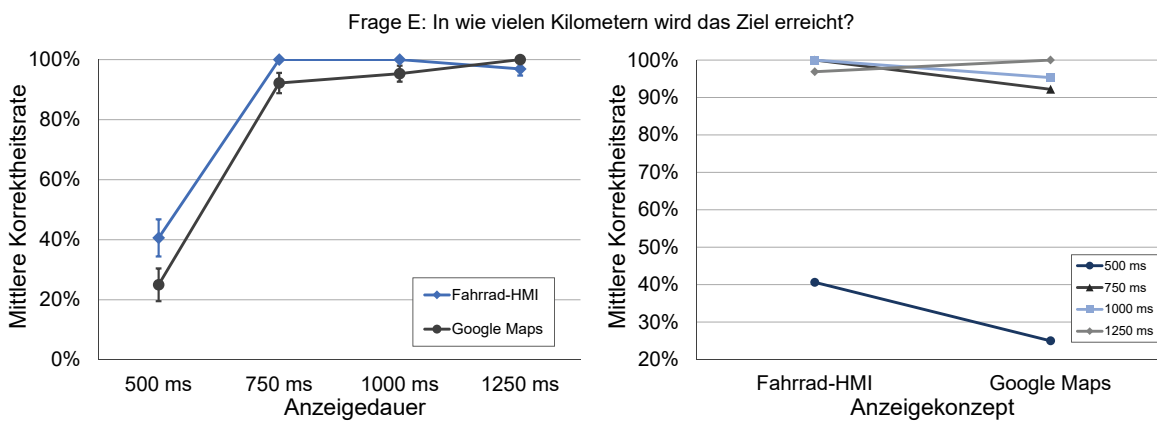


Abbildung D.7: Linienplot zu der Okklusionsaufgabe Nr. E (nach F. Winkler, 2020).

D.2.3 Ergebnisse zur Usabilitybewertung

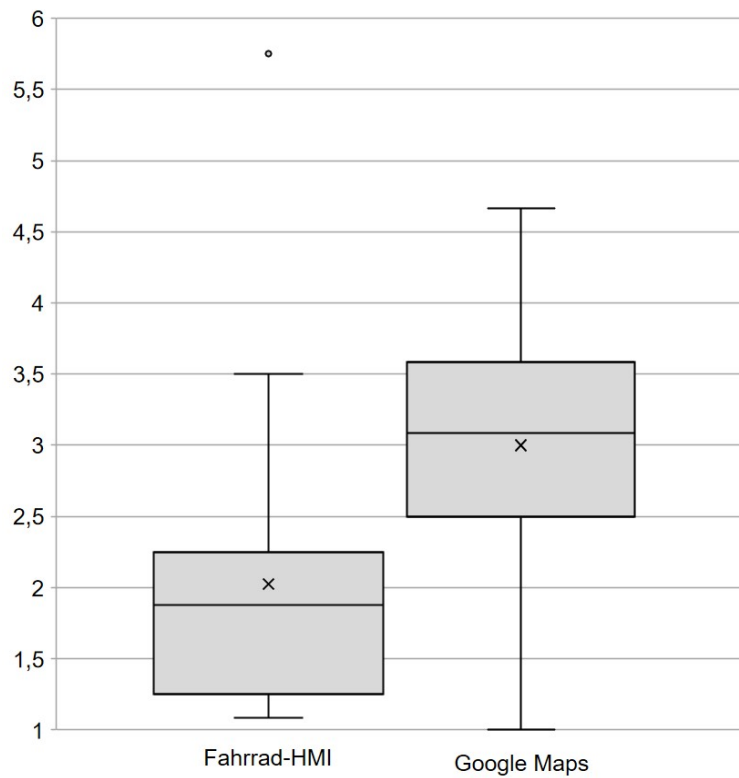


Abbildung D.8: Boxplot zu den gemittelten Antworten der beiden Konzepte (N = 32).